

高质量三维光子晶体的制备及其透射谱研究

刘桂强¹ 廖昱博² 刘忠民¹

(¹ 江西师范大学物理与通信电子学院, 江西 南昌 330022)
(² 赣南师范学院物理与电子信息学院, 江西 赣州 341000)

摘要 设计了简易的压强可控自组装实验装置, 制备了由直径为 260 nm 的聚苯乙烯(PS)胶体球组成的面心立方光子晶体。分析了压强的变化对光子禁带(PBG)深度及光子带隙边缘(PBE)坡度的影响, 确定了合适的压强生长环境($P = 5999.5 \text{ Pa}$)。利用该实验装置, 还进行了光子晶体的小批量制备, 一次性制得了三块光子晶体, 并从不同角度对每一块光子晶体的透射谱及不同光子晶体的透射谱进行了测量。同一光子晶体不同位置透射谱的重合、同一批次制备的不同光子晶体透射谱的一致性及光子禁带两侧的 Fabry-Pérot 振荡等均说明: 该装置制备的光子晶体在大区域、大面积上是高度有序、均一和平整的; 利用该实验装置进行光子晶体的小批量制备是可行的。

关键词 光学制造; 光子晶体; 自组装; 透射率; 光子禁带; 光子带隙边缘; Fabry-Pérot 振荡

中图分类号 O472⁺.3

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS20082812.2400

Fabrication and Transmittance Spectra of High Quality Three-Dimensional Photonic Crystals

Liu Guiqiang¹ Liao Yubo² Liu Zhongmin¹

(¹ Institute of Physics and Communication Electronics, Jiangxi Normal University, Nanchang, Jiangxi 330022, China)
(² Institute of Physics and Electronic Information, Gannan Normal University, Ganzhou, Jiangxi 341000, China)

Abstract A facile pressure controllable self-assembly apparatus was designed, and perfect three-dimensional face-centered cubic (FCC) photonic crystals (PCs) were fabricated by using polystyrene colloidal microspheres with diameter of 260 nm. The effects of pressures on photonic band gap depth and photonic band edge slope were analyzed and the optimal pressure condition ($P = 5999.5 \text{ Pa}$) for PCs growth was confirmed. Three photonic crystals were fabricated once and their transmittance spectra were measured. The transmittance spectra measured at different positions of the same PC and different PCs are similar. Fabry-Pérot oscillations appear at both sides of the main transmittance valley. PCs fabricated by this experimental apparatus are uniform, similar and highly ordered in the long-range crystal orientation and large areas. The experimental apparatus can be used to fabricate PCs in small-batch.

Key words optical fabrication; photonic crystal; self-assembly; transmittance; photonic band gap; photonic band edge; Fabry-Pérot oscillation

1 引 言

光子晶体是一种具有光子禁带和色散特性的折射率周期性变化的介质结构材料^[1,2], 对光具有很强的控制能力, 可用于制作激光器、光开关和分光镜等先进设备^[3~11]。高质量光子晶体的制作是光子晶体研究的一个重要内容, 关系到光子晶体的实际应用。在较弱的离子强度下, 稀溶液中高电荷密度

的单分散胶体球自发排列成密堆积的周期性结构(CCP), 通常为面心立方(FCC)结构, 这种方法称为自组装排列胶体晶体法, 它是发展光子晶体等亚微米周期有序结构及新型光电子器件的重要环节。电泳沉积法^[12]、垂直沉积法^[13,14]、水平沉积法^[15]等都是以此为基础发展起来的。其中由 Jiang 等^[13]提出的垂直沉积自组装法可制备出高度有序、大面积的样品, 并可通过改变初始介质中胶体颗粒的体积分

数来系统地控制沉积层数,这对光学应用非常有利。因此,该法成为了制备三维胶体晶体的热门方法。但该方法不适合大胶质球和长时间蒸发。为解决这类问题,人们采取改变实验温度、流速及蒸发速率等措施^[16~21],但制备的光子晶体的光子禁带(PBG)和光子带隙边缘(PBE)均无法满足实际的应用要求。Zhongyu 等^[14]提出了控制压强的自组合法,成功制备了具有较深光子禁带和较陡峭光子带隙边缘的光子晶体,但当蒸发量较大时,长吸水管中难免会有残留水分,这些滞留水分对实验结果会存在一定影响。本文对 Zhongyu 等^[14]的实验装置加以改装和完善,采用密封硅胶颗粒吸水装置来维持生长皿里较稳定的生长环境,将自组合法生长法改装成了简单易行的可重复生产的实验装置。利用直径为 260 nm 的聚苯乙烯(PS)胶体球进行了光子晶体样品的制备;讨论了生长过程中压强的变化对光子晶体质量的影响;从透射谱、光子禁带深度及光子带隙边缘坡度等方面分析了光子晶体样品的质量,并对小批量制备的光子晶体透射谱进行了对比分析。

2 实验方法

实验所使用的 PS 胶体球为 Duke 公司生产,直径为 260 nm,质量分数为 10%,标准偏差在 3% 内。将含有 PS 小球的悬浮溶液每隔 10 分钟低温处理 20 分钟,连续处理三次,使之成为单分散的均一胶体溶液,然后用去离子水稀释到 0.5%。基底为常见的显微镜载波片(基底),用浓硫酸浸泡五天后经无水乙醇和丙酮清洗干净,再放到去离子水中浸泡,最后用高压 N₂ 气流吹干。

实验装置如图 1 所示。实验时,将洁净的基底竖直固定在玻璃生长皿中。再将已配好的 PS 小球胶体溶液平缓注入生长皿中,然后等温加热水槽中的水,使得生长皿中的溶剂稳定蒸发,被蒸发的气流在真空抽气泵的作用下,经导气管迅速进入到装有硅胶颗粒的密封瓶中,气流中的水份就会被硅胶迅速吸干,不至于在导气管壁附近滞留,这样就形成了稳定的温度、湿度和压强环境,有利于光子晶体的制备。压强的控制主要是通过导气管上面的旋钮小阀门来控制,大小通过真空压强计读出。温度由温度计读出,整个实验温度控制在 35 °C。在表面张力和毛细作用力下,生长皿中的 PS 胶体球就会在基底上沉积,形成高度有序的光子晶体。实验中采用较大的生长皿(比如较大的竖式生长皿)时,同时插入多块载波片,则每块载波片上都可沉积 PS 胶体球,

这样就可以一次性生成多块光子晶体。

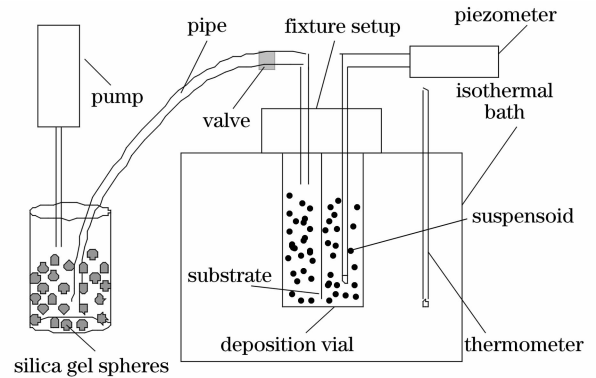


图 1 压强可控自组合法实验装置

Fig. 1 Experimental setup of pressure controllable self-assembly

3 实验结果与分析

3.1 透射特性的研究与分析

采用溴钨灯作为照射光源来测量光子晶体样品的透射率,光线经显微物镜聚焦后,进入光栅光谱仪狭缝,经光栅分光为 350nm 至 850nm 波段的单色光并平行射到光子晶体样品(111)面上,出射信号由光电探测器接收。

图 2 是在不同压强下制得的光子晶体透射谱线,压强大小依次为 5333.0 Pa、5999.5 Pa、6666.1 Pa、7332.7 Pa 和 7999.3 Pa。图 2 中光子禁带的中心波长为 585~598 nm,这表明光子晶体的光子禁带中心位置受压强影响不大。对于 FCC 型的光子晶体,其晶格常数 $a = 2^{1/2}d$, d 为 PS 胶体球的直径;占空比 $f = 2\pi d^3 / (3a^3)$ ^[20,21]。根据 Bragg 定律^[21,22]可知,光子禁带的中心波长满足

$$\lambda_c = 2\sqrt{2/3}d[fn_{ps} + (1-f)n_{air}]$$

PS 小球折射率 $n_{ps} = 1.59$,空气折射率 $n_{air} = 1$ 。计算得到由直径为 260 nm 的 PS 胶体球构成的光子晶体,光子禁带的中心波长约为 610 nm。可见实验制备的光子晶体光子禁带的中心波长与理论计算结果是很接近的。

图 2 还显示,压强处于 5999.5~7332.7 Pa 时,有较深的光子禁带和较陡峭的光子带隙边缘;光子禁带区信号的透射率 $\leq 13\%$,表明在此压强范围内制备的光子晶体对光具有很强的局域能力。当 $P = 5333.0$ Pa 和 7999.3 Pa 时,光子禁带较浅且光子带隙边缘较平缓;禁带区内信号的透射率超过了 30%,这是因为过低或过高的压强,导致溶液蒸发过快或过慢而使得 PS 胶体球在基底上沉积的厚度不够

或无序,从而导致带隙对光的局域不够强所致。光子禁带的深度与光子带隙边缘的坡度决定了光子晶体质量的好坏,深度越深,坡度越陡,光子晶体的质量也越好^[14]。因此研究了在不同压强下制备光子晶体的光子禁带深度及光子带隙边缘坡度与压强的关系,见图3。从图3可见,当 $P = 5999.5$ Pa时,光子禁带最

深(66%);光子带隙边缘坡度最陡(6%/nm),说明在 $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,将压强控制在 5999.5 Pa时制备的光子晶体质量最好。 $6\%/nm$ 的光子带隙边缘坡度变化表明:在光子禁带边缘,入射光波长 λ 每变化 1 nm,透射比就会发生 6% 的改变,为超快全光学开关的发展提供了基础。

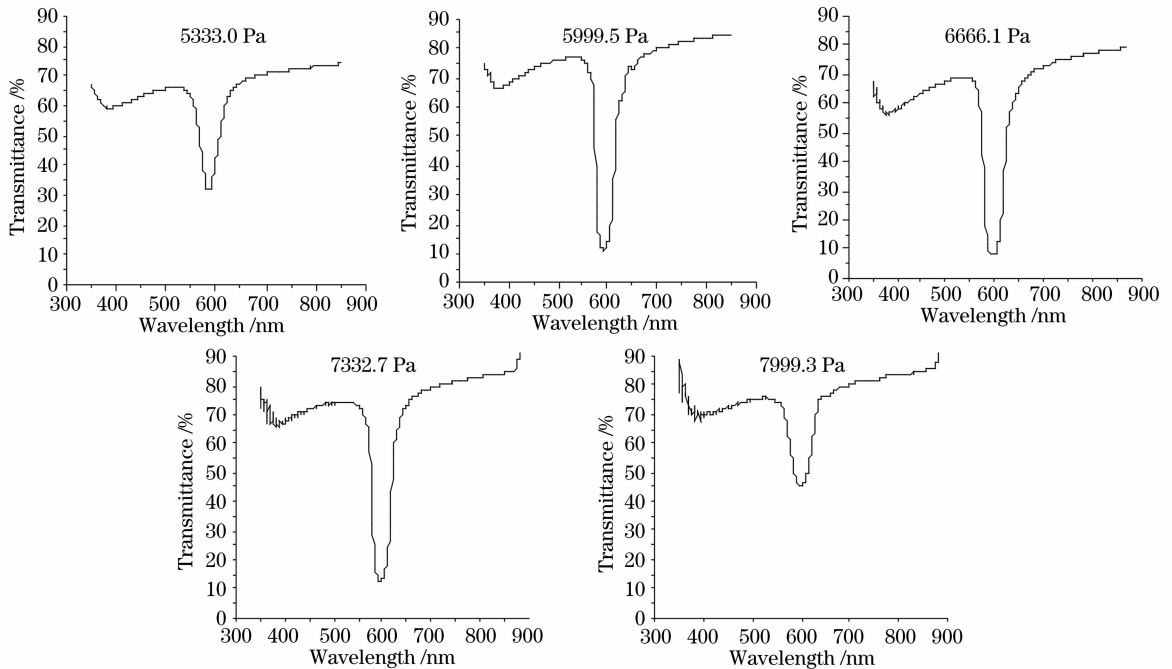


图2 不同压强下制备的光子晶体透射比与波长的关系

Fig. 2 Relation between transmittance of photonic crystal fabricated under different pressures and wavelength

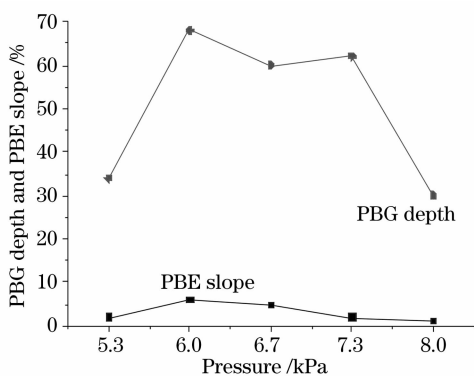


图3 光子禁带深度或光子带隙边缘坡度与压强的关系

Fig. 3 Relation between photonic band gap depth, photonic band edge slope and pressure

3.2 高度有序性和小批量制备

实验装置还能一次性制备三块光子晶体。当温度为 $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、压强 $P = 5999.5$ Pa时,在生长皿中同时

插入三块载波片,则在每块载波片上都会有PS胶体球沉积,即在一次制备过程中,可同时制得三块光子晶体。对于每一块光子晶体,都依次选择了四个不同区域来进行透射率的测量,三块光子晶体即可得到三组透射率与波长的关系曲线,见图4。从图4可见,同一样品不同区域的透射光谱基本重合,这说明制备的光子晶体样品在大面积上是高度有序的;三组数据的透射谱基本一致,说明批量制备的光子晶体质量基本相同。此外,三组透射谱中光子禁带两侧的透射曲线均呈现波浪起伏,即Fabry-Pérot振荡。Fabry-Pérot振荡^[22,23]是由于光波被光子晶体顶端和底端反射,由反射光发生干涉引起。Fabry-Pérot振荡的出现说明这些光子晶体样品在整体上是非常平整、均一的,且在大区域、大面积上是相似的。可见,利用实验装置,将温度、压强分别控制在 $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 5999.5 Pa时,即可进行高度有序三维光子晶体的小批量制备。

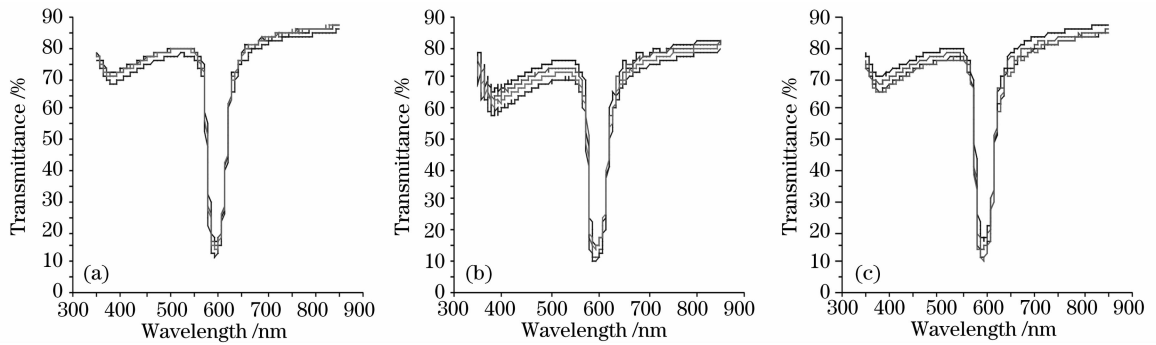


图4 一批次制备的三块光子晶体在不同位置的透射率

Fig. 4 Transmittance of three photonic crystals fabricated in once batch at different positions

4 结 论

采用密封硅胶颗粒吸水装置的压强控制自组装机,解决了实验生长过程中压强、温度及湿度的不稳定问题,得到了人工调控且具有高可重复性、简易可行的制备高质量三维光子晶体的方法。在不同压强下进行了光子晶体的制备,确定了在溶液质量分数为0.5%,温度为35℃,压强 $P=5999.5$ Pa时,制备的光子晶体具有很深的光子禁带、陡峭的光子带隙边缘,并且在大面积上具有高度有序性、均一性和平整性。深的光子禁带深度和陡峭的光子带隙边缘坡度,为超快全光学开关的研究提供了基础。一次性制备三块高度有序光子晶体实验的成功,有助于促进光子晶体的批量制备及投入实际应用方面的发展。

参 考 文 献

- 1 E. Yablonovitch. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1987, **58**(20): 2059~2062
- 2 S. John. Strong localization of photonics in certain disordered dielectric super lattices[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1987, **58**(20): 2486~2489
- 3 O. Toader, S. John, K. Busch. Optical trapping, field enhancement and laser cooling in photonic crystals[J]. *Opt. Exp.*, 2001, **8**(3): 217~222
- 4 Liu Shengli, Li Yigang, Gao Yanli *et al.*. High-power widely tunable Yb-doped photonic crystal fiber laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(9): 1663~1667
刘胜利, 李乙钢, 高艳丽等. 高功率宽调谐范围掺Yb³⁺光子晶体光纤激光器[J]. *光学学报*, 2007, **27**(9): 1663~1667
- 5 Wang Qing-yue, Hu Ming-lie, Song You-jian *et al.*. Larger-mode-area photonic crystal fiber laser output high average power femtosecond pulses[J]. *Chin. J. Lasers*, 2007, **34**(12): 1603~1606
王清月, 胡明列, 宋有建等. 用大模场光子晶体光纤获得高功率飞秒激光[J]. *中国激光*, 2007, **34**(12): 1603~1606
- 6 Zhu Zhihong, Ye Weimin, Ji Jiarong *et al.*. Optimization for electrically driven single-cell photonic crystal laser cavity[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(3): 545~549
朱志宏, 叶卫民, 季家镨等. 优化电激励光子晶体单缺陷激光腔结构[J]. *光学学报*, 2007, **27**(3): 545~549
- 7 Xiaopeng Shen, Kui Han, Xiangqing Yang *et al.*. Polarization-independent self-collimating bends and beam splitters in photonic crystals[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, **5**(11): 662~664

- 8 Shaoji Jiang, Jianrong Li, Jijia Tang *et al.*. Multi-channel and sharp angular spatial filters based on one-dimensional photonic crystals[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2006, **4**(10): 605~607
- 9 H. Nakamura, Y. Sugimoto, K. Kanamoto *et al.*. Ultra-fast photonic crystal/quantum dot all-optical switch for future photonic networks[J]. *Opt. Exp.*, 2004, **12**(26): 6606~6614
- 10 M. F. Yanik, F. Shanhui, M. Soljacic. High-contrast all-optical bistable switching in photonic crystal microcavities[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2003, **83**(14): 2739~2741
- 11 Zhang Wenfu, Fang Qiang, Cheng Yihua *et al.*. Narrow band interleaver based on one-dimensional photonic crystal with positive-negative index alternant multilayer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(9): 1695~1699
张文富, 方强, 程益华等. 正负折射率交替一维光子晶体窄带梳状滤波器[J]. *光学学报*, 2007, **27**(9): 1695~1699
- 12 M. Holgado, F. Garcia-Santamaria, A. Blanco *et al.*. Electrochemical deposition to control artificial opal growth[J]. *Langmuir*, 1999, **15**(14): 4701~4704
- 13 P. Jiang, J. F. Bertone, S. Hwang *et al.*. Single-crystal colloidal multilayers of controlled thickness[J]. *Chem. Matter.*, 1999, **11**(8): 2132~2140
- 14 Z. Zhongyu, L. Xizhe, L. Yanhong *et al.*. Pressure controlled self-assembly of high quality three-dimensional colloidal photonic crystals[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2007, **90**(5): 051910
- 15 Y. Qingfeng, X. S. Zhao, Z. Zuocheng. Fabrication of colloidal crystal heterostructures using a horizontal deposition method[J]. *J. Cryst. Growth*, 2006, **288**(1): 205~208
- 16 S. Wong, V. Kitaev, G. A. Ozin. Colloidal crystal films: advances in universality and perfection[J]. *J. Am. Chem. Soc.*, 2003, **125**(50): 15589~15598
- 17 Y. A. Vlasov, X. Z. Bo, J. C. Strum *et al.*. On-chip maturational assembly of silicon photonic bandgap crystals[J]. *Nature*, 2001, **414**(6861): 289~293
- 18 V. Kitaev, G. A. Ozin. Self-assembled surface patterns of binary colloidal crystals[J]. *Adv. Mater.*, 2003, **15**(1): 75~78
- 19 I. I. Tarhan, H. W. George. Analytical expression for the optimized stop bands of fcc photonic crystals in the scalar-wave approximation[J]. *Phys. Rev. B*, 1996, **54**(11): 7593~7597
- 20 R. D. Pradhan, I. I. Tarhan, G. H. Watson. Impurity modes in the optical stop bands of doped colloidal crystals[J]. *Phys. Rev. B*, 1996, **54**(19): 13721~13726
- 21 Y. Qingfeng, Z. Zuocheng, X. S. Zhao. Inward-growing self-assembly of colloidal crystal films on horizontal substrates[J]. *Langmuir*, 2005, **21**(7): 3158~3164
- 22 K. Wostyn, Y. Zhao, G. Schaetzen *et al.*. Insertion of a two-dimensional cavity into a self-assembled colloidal crystal[J]. *Langmuir*, 2003, **19**(10): 4465~4468
- 23 W. Likui, Y. Qingfeng, X. S. Zhao. From planar defect in opal to planar defect in inverse opal[J]. *Langmuir*, 2006, **22**(8): 3481~3484