

文章编号 : 0253-2239(2002)02-0220-03

池厚对 SiO₂ 胶体光子带隙的影响*

何拥军¹⁾²⁾ 苏慧敏¹⁾ 王霞¹⁾ 汪河洲¹⁾* * 唐芳琼³⁾ 董鹏⁴⁾

- (1), 中山大学超快速激光光谱学国家重点实验室, 广州 510275
- (2), 广东省电力集团公司通信中心, 广州 510600
- (3), 中国科学院感光化学研究所, 北京 100101
- (4), 石油大学重质油加工国家重点实验室, 北京 102200

摘要: 在薄池中, 胶体晶体生长的速度比在厚池中快而且质量好。不同分散度的小球自排的实验结果表明, 较分散度的 SiO₂ 小球在超薄池中也能形成质量较好的单晶。光子带隙波长在薄池中有明显的红移, 池厚为 0.07 mm 的胶体单晶的带隙波长比池厚为 1 mm 的胶体单晶的带隙波长红移了 24 nm。

关键词: 光子带隙; 胶体晶体; 薄池

中图分类号: TN204 文献标识码: A

1 引 言

光子晶体是一种介电函数的光学亚波长周期结构, 当光入射到该晶体时, 一定频率的光将被这些周期结构所散射而不能通过, 使透过谱形成一定宽度的禁带。光子晶体具有一系列崭新特性, 如抑制自发辐射、无阈值激射和直角光导波等^[1-3]。由于光子晶体的特殊光学性质, 它将在光学中起类似电子学中的半导体的作用。因此近年来光子晶体的研究成为人们普遍关注的热点。光子晶体的崭新的性质激起了人们对它的理论和实验研究的广泛兴趣。自 1990 年理论研究指出金刚石结构有完全光子带隙以来^[4], 三维光子晶体的理论研究和实验制作一直受到高度重视。不同于半导体, 由于不存在天然的光子晶体, 使光子晶体实验研究的发展完全依赖于人工亚光学波长结构制作技术。对可见光波段, 就目前的技术水平, 亚波长结构制作还是一项挑战性工作。因此, 光子晶体的理论计算的结果多数先用技术上较容易实现的微波区实验进行证实, 所以实验制作方面的多数报道都在微波、毫米波和红外波段^[5-10]。在光学波段, 被广泛研究的三维结构是用各向同性的单分散(粒径标准差小于 5%)的聚苯乙烯或 SiO₂ 小球自排形成的面心立方(FCC)晶体, 它

是非完全光子带隙晶体^[11-17]。这种结构在 30 年前已经开始被研究, 但当时不是从光子晶体研究的目的出发。直到 1997 年面心立方结构胶体晶体的空间取向及其带隙随入射角的变化才被报道^[13]。虽然面心立方晶体具有的是非完全光子带隙, 但因它比较容易制作, 使它成为现阶段光子晶体性质的现实和方便的研究对象。本文研究了池的厚度对胶体单晶的形成和光子带隙的影响。

2 实 验

我们制备了亚光学波长直径的 SiO₂ 小球。将相同分散度、粒径和浓度的小球取适当的量分别注入厚度为 0.07 mm 和 1 mm 的样品池中使其静置自排形成胶体单晶。由于在高质量分数(大于 0.035)条件下自排形成的是面心结构^[10], 所以本实验中小球的质量分数高于 0.20。自排过程: 在刚开始时样品呈乳白色, 长成单晶后呈彩色玻璃一样的透明状, 且有随方向变化的彩色反射光。在生长过程中, 透明的晶体与未成晶体的乳白色区之间有明显的分界线, 此分界线由样品池底逐日上移。实验中的透射光谱是用日本岛津产的 UV240 分光光度计进行测量的。

3 实验结果和讨论

实验结果表明, 池的厚度对大面积胶体单晶的形成速度、质量和光子带隙波长有明显的影响。因

* 国家自然科学基金(19934002、19874083) 教育部重点基金和广东省自然科学基金资助课题。

** 联系人, Email: stswzhz@zsu.edu.cn

收稿日期 2001-02-21; 收到修改稿日期 2001-04-12

透明的晶体与未成晶体的乳白色区之间有明显的分界线,在薄池中此分界线的上升速度明显比厚池中的要快得多。制作同样高度的样品,若在薄池中半个月到一个月内可生长完成,在厚池中则需大约 2 到 3 个月的时间。在晶体质量方面,在厚池中只要小球的分散度稍不理想,晶体中就有许多树状瑕疵;而薄池中在分散度相对差的条件下仍然是清澈一片,形成较完整的单晶。粒径误差为 10% 的小球在 1 mm 厚池中完全无法生长出胶体单晶,但在超薄池中则可实现。

图 1 是分散度为 3.6% 的 SiO₂ 小球在两种厚度的样品池中制作出的样品。其中图 1(a)~图 1(d) 对应的入射角分别为 0°、20°、30°、45°。此入射角指的是入射光相对于样品池表面法线的夹角。对照图 1 中的实线和虚线可看出:禁带波长位置与样品厚度相关,厚度为 0.07 mm 的样品的带隙在垂直入射时的波长为 715 nm,而厚度为 1 mm 的样品的带隙在垂直入射时波长为 691 nm。薄池比厚池的带隙红移了 24 nm(图 1 中两样品的透射谱在同一高度测得)。我们用不同的 SiO₂ 小球作了重复实验,得到与上述相同的结果。另一方面,厚薄池都相一致的有:两样品的禁带宽度都是约为 30 nm,两样品的禁带波长都随入射角度的变化而变化,即都是非完全带隙。其中,在入射角为 0°、20°、30°、45° 时,0.07 mm 厚的样品的禁带波长分别位于 715 nm、697 nm、682 nm、653 nm,而 1 mm 厚的样品的禁带波长分别位于 691 nm、680 nm、655 nm、622 nm 处。都是 0° 所对应的禁带波长最长。这表明,与样品池表面平行的胶体单晶的晶面为面心立方的密排面。

在一个样品池中,上部样品的带隙波长相对池下部的也会红移。但由于我们所制作的不同厚度样品的高度相同,测量点的高度也相同,因此以上实验结果已排除了这一影响。从前人的面心立方蛋白石晶体研究已知,蛋白石的厚度增加时,沿同一方向的带隙中心波长不变,透过率单调减小。本实验发现带隙位置随厚度增加而蓝移是胶体单晶与蛋白石晶体的差别。其原因如下:在蛋白石中, SiO₂ 小球间是密排的,厚度的改变并不影响小球的间距。SiO₂ 胶体晶体中颗粒并非密排,池内任何相互作用力的改变都会导致其间距的变化,也就是晶体的面间距要变化。SiO₂ 胶体晶体中的作用力种类很多,包括重力、静电相互作用、池壁对小球和液体的作用、范德瓦尔斯作用等等,其中重力和池壁对小球及液体

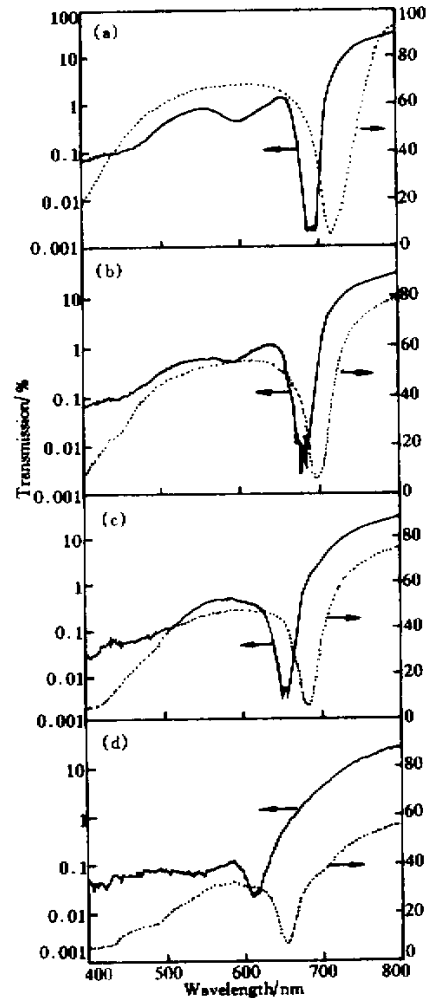


Fig. 1 The transmission spectra of colloidal crystal in 1 mm cell (solid line, logarithm scale) and in 0.07 mm cell (dashed line, linear scale), with incident angles of (a) 0°; (b) 20°; (c) 30°; (d) 45°

的作用是最关键的,后者又称毛细作用力。在同一个样品池中,上部样品的带隙波长相对池下部的也会红移是由于下部的样品受到上部样品重力的压迫使池下部的晶体相对密排。在本实验中,薄池和厚池测量高度一致,不存在重力不同的影响。带隙波长红移是晶格常数增大的表现。薄池中晶格常数增大的原因分析如下:池壁对微小的小球有粘附的作用力,此附着层的附着力可克服小球重力,而池中间部分的颗粒受重力向下,但在较近的区域由小球间的相互作用达到平衡使较近的区域晶格常数一致,在薄池中,总重量小,池壁附着的作用就明显,最后使 SiO₂ 胶体晶体中颗粒能以较大的间隔排列,即

晶格常数较大,反映在光子带隙波长上则出现红移。

结论 实验表明,胶体光子晶体的厚度显著地影响胶体晶体的质量及其带隙性质。在薄池中,胶体单晶形成的速度快且质量好。较差分散度的 SiO_2 小球也能在薄池中形成胶体单晶。在薄池中光子带隙波长明显红移,池厚为 0.07 mm 的胶体单晶的带隙波长比池厚为 1 mm 的胶体单晶的带隙波长红移了 24 nm。

参 考 文 献

- [1] Yablonovitch E. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics. *Phys. Rev. Lett.*, 1987, **58** (20) 2059~2062
- [2] Joannopoulos J D, Villeneuve P R, Fan S. Photonic crystals: Putting a new twist on light. *Nature*, 1997, **386** (6621) 143~149
- [3] Painter O, Lee R K, Scherer A *et al.*. Two-dimensional photonic band-gap defect mode laser. *Science*, 1999, **284** (5421) 1819~1821
- [4] Ho K M, Chan C T, Soukoulis C M. Existence of a photonic gap in periodic dielectric structures. *Phys. Rev. Lett.*, 1990, **65** (25) 3152~3155
- [5] Lin S Y, Fleming J G, Hetherington D L *et al.*. A three-dimensional photonic crystal operating at infrared wavelengths. *Nature*, 1998, **394** (6690) 251~253
- [6] Noda S, Tomoda K, Yamamoto N *et al.*. Full three-dimensional photonic bandgap crystals at near-infrared wavelengths. *Science*, 2000, **289** (5479) 604~606
- [7] Ozbay E, Michel E, Tuttel G *et al.*. Micromachined

- millimeter-wave photonic band-gap crystals. *Appl. Phys. Lett.*, 1994, **64** (16) 2059~2061
- [8] Ozbay E, Michel E, Tuttel G *et al.*. Terahertz spectroscopy of three dimensional photonic band-gap crystals. *Opt. Lett.*, 1994, **19** (15) 1155~1157
- [9] Ozbay E. Layer-by-layer photonic crystals from microwave to far-infrared frequencies. *J. Opt. Soc. Am. (B)*, 1996, **13** (9) 1945~1955
- [10] Blanco A, Chomski E, Grabtchak S *et al.*. Large-scale synthesis of a silicon photonic crystal with a complete three-dimensional bandgap near 1.5 micrometres. *Nature*, 2000, **405** (6785) 437~439
- [11] Yablonovitch E, Gmitter T J. Photonic band structure: the face-centered-cubic case. *Phys. Rev. Lett.*, 1989, **63** (18) 1950~1953
- [12] Leung K M, Liu Y F. Full vector wave calculation of photonic band structures in face-centered-cubic dielectric media. *Phys. Rev. Lett.*, 1990, **65** (21) 2646~2649
- [13] Tarhan I I, Watson G H. Photonic band structure of fcc colloidal crystals. *Phys. Rev. Lett.*, 1996, **76** (2) 315~318
- [14] Mei D B, Liu H G, Cheng B Y *et al.*. Visible and near-infrared silica colloidal crystals and photonic gaps. *Phys. Rev. (B)*, 1998, **58** (1) 35~38
- [15] Mei D B, Dong P, Li H Q *et al.*. Structure and transmission spectra for colloidal crystals with silica spheres. *Chin. Phys. Lett.*, 1998, **15** (1) 21~23
- [16] Li Z L, Ni P G, Cheng B Y *et al.*. Silica colloidal crystals with ethanol solvent. *Chin. Phys. Lett.*, 2000, **17** (2) 112~114
- [17] Chan Y S, Chan C T, Lin Y Z. Photonic band gaps in two dimensional photonic quasicrystals. *Phys. Rev. Lett.*, 1998, **80** (5) 956~959

Photonic Band Gap in Thickness Dependent SiO_2 Colloidal Crystals

He Yongjun¹⁾²⁾ Su Huimin¹⁾ Wang Xia¹⁾ Wang Hezhou¹⁾
Tang Fangqiong³⁾ Dong Peng⁴⁾

- (1), State Key Laboratory of Ultrafast Laser Spectroscopy, Zhongshan University, Guangzhou 510275
(2), Guangdong Electric Power Telecommunication Centre, Guangzhou 510600
(3), Institute of Photographic Chemistry, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101
(4), State Key Laboratory of Heavy Oil, University of Petroleum, Beijing 102200

(Received 21 February 2001; revised 12 April 2001)

Abstract: The colloidal crystals of SiO_2 spheres were grown in cells of different thickness. The results show that the colloidal crystal grows much quickly in 0.07 mm cell than that in 1 mm cell, and the crystal quality in 0.07 mm cell is much better than that in 1 mm cell. In ultra-thin cell, the high quality colloidal crystal can be grown with large diametrical error of the silica spheres. The band gap of the colloidal crystal in 0.07 mm cell has a red shift of 24 nm over that in 1 mm cell.

Key words: photonic band gap; colloidal crystal; thin cell