

文章编号: 0253-2239(2006)02-0279-4

# 光全息制作的变形面心立方结构光子晶体的带隙\*

朱少安 钟永春 汪河洲\*\*

(中山大学光电材料和技术国家重点实验室, 广州 510275)

**摘要:** 四束激光从空气直接入射到平面结构的感光树脂所制备的面心立方结构实际上是一种不但晶格沿[111]方向拉伸,而且其格点也在[111]方向被拉长的变形面心立方结构。在对这种变形面心立方结构的光子晶体的晶格形状及能带分布的研究中,通过利用麻省理工学院的光子晶体能带计算程序计算了各种参量对此变形面心立方结构的蛋白石和反蛋白石的能带分布的影响,发现在一定条件下该结构的蛋白石会出现完全光子带隙。用激光全息聚合在正胶的环氧树脂中可制作反蛋白石模板,若用此模板制作硅蛋白石,当晶格沿[111]方向拉伸 2.1 倍和硅的占空比为 13.7% 时出现最大的带隙宽度。此最大带隙宽度的结构的制作光路是三角锥形光路,对称地环绕中央光束的三束外围激光束之间夹角为  $54.0^\circ$ ,三束外围激光束与中央激光束夹角为  $31.6^\circ$ 。

**关键词:** 光电子学; 光子晶体; 变形面心立方; 光全息; 完全光子带隙

中图分类号: O436 文献标识码: A

## Photonic Band Gap of the Distorted Face-Center-Cubic Structure Photonic Crystal Fabricated by Holographic Lithography

Zhu Sha'an Zhong Yongchun Wang Hezhou

(State Key Laboratory of Optoelectronic Materials and Technologies, Sun Yet-Sen University, Guangzhou 510275)

**Abstract:** The face-center-cubic structure obtained by four incident laser beams directly from air to photoresist of planar construction, is actually a kind of distorted face-center-cubic structure. Both of its lattices and its latticesites are lengthened along [111] direction. In the study on the lattice shape and band structure of this distorted face-center-cubic structure, using MIT's Photonic-Bands program, after calculating the relations between the energy band structure and all kinds of parameters of opal and inverse opal, a complete photonic band-gap in its opal structure is obtained. The largest photonic band-gap is obtained as the lengthening ratio is 2.1 and the filling ratio of silica is 13.7%. For fabrication of this structure with largest photonic band-gap by holographic lithography method, which needs two steps (fabrication of opal and fabrication of inverse opal by filling), the three outer beams are placed symmetrically around the central beam, the three outer beams are  $54.0^\circ$  apart, and the angles between the central beam and outer beams are  $31.6^\circ$ .

**Key words:** optoelectronics; photonic crystal; distorted face-center-cubic; holographic lithography; complete photonic band-gap

## 1 引 言

周期结构介电函数存在类似于半导体能带结构的禁带,称之为光子带隙,频率落在光子带隙内的电磁波不能在光子晶体中传播<sup>[1,2]</sup>。由于具有巨大的应用前景<sup>[3,4]</sup>,光子晶体成为被广泛关注的重要研究课题。其实验制作方面,三维光子晶体的激光全息聚合

方法<sup>[5]</sup>一出现就引起了学术界广泛的兴趣,世界上许多研究小组均利用此方法制作出多种类型的光子晶体模板<sup>[6~8]</sup>。激光全息聚合方法制作的典型结构是面心立方(FCC)结构。在早期,它的制作是用四束激光从空气直接入射平面结构的感光树脂产生全息干涉制成<sup>[5]</sup>。然而,2003年人们才认识到这种光束配置

\* 国家自然科学基金(10274108)、国家 973 计划(2003CB314901、2004CB719804)、国家 863 计划(2003AA311022)和广东省自然科学基金资助课题。

作者简介: 朱少安(1979~),男,广东惠东人,中山大学物理科学与工程技术学院硕士研究生,主要从事光子晶体的研究。

\*\* 通信联系人。E-mail: stswzhz@zsu.edu.cn

收稿日期: 2005-03-04; 收到修改稿日期: 2005-04-21

只能在空气中形成面心立方结构<sup>[8]</sup>,因为光从空气斜入射进入感光树脂会产生折射,所以在感光树脂中形成的是一种晶格沿[111]方向拉伸的变形面心立方结构,同时其格点也沿[111]方向拉长成椭球状。

本文对这类变形面心立方结构的蛋白石和反蛋白石的能带结构进行研究。研究发现,当拉伸量、占空比和介电常量满足一定的条件时,此变形蛋白石结构具有完全光子带隙。本文给出了对应最宽完全

光子带隙的激光全息光路。

## 2 结构与计算结果

图 1(a)是面心立方晶胞,图 1(b)是面心立方晶胞沿[111]方向拉伸一定量后的晶胞,图 1(c)是椭球状格点(长轴沿[111]方向)的面心立方晶胞沿[111]方向拉伸的变形面心立方晶胞,即本文的研究对象。

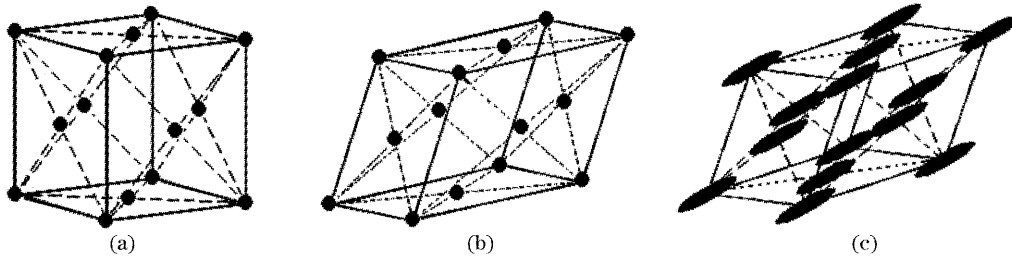


图 1 (a)面心立方晶胞,(b)沿[111]方向拉伸的变形面心立方晶胞,(c)椭球状格点、晶格沿[111]方向拉伸的变形面心立方晶胞

Fig. 1 Structure of face-centred cubic crystal cell (a), lengthened along [111] (b), lengthened along [111] with ellipsoid lattice-sites (c)

面心立方晶胞沿[111]方向拉伸所形成的变形面心立方晶胞是一个面心菱面体,当拉伸  $k$  倍时,晶胞基矢为

$$\begin{cases} \mathbf{a} = [a/\sqrt{3(k^2+2)}](k+2, k-1, k-1), \\ \mathbf{b} = [a/\sqrt{3(k^2+2)}](k-1, k+2, k-1), \\ \mathbf{c} = [a/\sqrt{3(k^2+2)}](k-1, k-1, k+2), \end{cases} \quad (1)$$

其中  $a$  为晶格常量。

其原胞取法与面心立方晶格相同,原胞基矢为

$$\begin{cases} \mathbf{a}_1 = \frac{a}{2\sqrt{3(k^2+2)}}(2k-2, 2k+1, 2k+1), \\ \mathbf{a}_2 = \frac{a}{2\sqrt{3(k^2+2)}}(2k+1, 2k-2, 2k+1), \\ \mathbf{a}_3 = \frac{a}{2\sqrt{3(k^2+2)}}(2k+1, 2k+1, 2k-2), \end{cases} \quad (2)$$

相应的倒格子原胞基矢为

$$\begin{cases} \mathbf{b}_1 = \frac{2\pi}{a} \frac{\sqrt{3(k^2+2)}}{9k}(1-4k, 1+2k, 1+2k), \\ \mathbf{b}_2 = \frac{2\pi}{a} \frac{\sqrt{3(k^2+2)}}{9k}(1+2k, 1-4k, 1+2k), \\ \mathbf{b}_3 = \frac{2\pi}{a} \frac{\sqrt{3(k^2+2)}}{9k}(1+2k, 1+2k, 1-4k). \end{cases} \quad (3)$$

利用麻省理工大学的光子晶体能带计算程序,考虑了占空比和沿[111]方向的拉伸量等参量的影响。从计算结果发现:此结构在第四能带和第五能带间出现完全光子带隙,如图 2 所示。图 2 对应的

参量是:用正胶激光全息制作了环氧树脂反蛋白石模板后,制成硅蛋白石,硅介电常量  $\epsilon_{\text{Si}} = 11.56$ ,背景为空气,介电常量  $\epsilon_{\text{air}} = 1$ ,晶格沿[111]方向拉伸 2.1 倍,硅的占空比为  $f = 13.7\%$  时,带隙宽度为中

心频率的 2.47%。

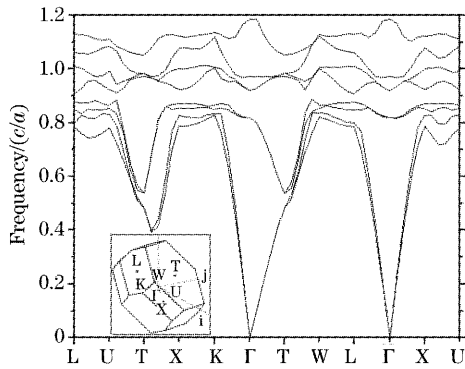


图 2 椭球状格点、晶格沿[111]方向拉伸 2.1 倍的变形面心立方结构的光子晶体能带分布图。插图为第一布里渊区和对称点

Fig. 2 The photonic band structure of the optimized face-centred cubic architecture lengthened along [111] with ellipsoid lattice-site. The positions of the high symmetrical points together with the first Brillouin zone are shown in the insert

计算结果还表明：完全光子带隙出现在面心立方晶格沿[111]方向拉伸 1.8 倍至 2.3 倍之间，其中，面心立方晶格沿[111]方向拉伸 1.9 倍至 2.2 倍之间时带隙宽度大于中心频率的 1%，如图 3 所示。关于占空比，约 15% 时产生最宽的完全光子带隙，

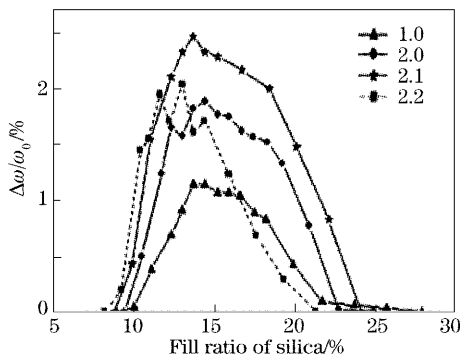


图 3 沿[111]方向的不同拉伸量及占空比对带隙宽度与带隙中心频率之比的影响，图例中的数字表示拉伸倍数

Fig. 3 The gap to mid-gap ratio versus the fill ratio of silica with different quantity of lengthening along [111]. The numbers in the legend are quantities of lengthening

但是随着拉伸量的增大，能产生完全光子带隙的占空比的最小值和最大值均减小，产生最大完全光子带隙相应的占空比也减小。

### 3 激光全息光路

理论上已经证明，通过多束激光干涉全息方法可以得到所有的简单光学晶格<sup>[9]</sup>。对应最大完全光子带隙的椭球状格点的变形面心立方晶格的激光全息光路也可以准确设计。

变形面心立方结构与面心立方结构制作的光路配置<sup>[9]</sup>的差别只在光束间的夹角不同。

设中央光束为

$$\mathbf{k}_4 = \frac{2\pi}{\lambda} \left( \frac{1}{\sqrt{3}}, \frac{1}{\sqrt{3}}, \frac{1}{\sqrt{3}} \right), \quad (4)$$

其中  $\lambda$  为激光在感光树脂中的波长。

另外三束光为

$$\mathbf{k}_i = \frac{2\pi}{\lambda} (k_{ix}, k_{iy}, k_{iz}), \quad (i = 1, 2, 3) \quad (5)$$

把变形面心立方晶格的倒格基矢写成

$$\mathbf{b}_i = \frac{2\pi}{a} (b_{ix}, b_{iy}, b_{iz}), \quad (i = 1, 2, 3) \quad (6)$$

周围三束光与中央光束以及该结构的倒格基矢的关系为

$$\mathbf{k}_i - \mathbf{k}_4 = \mathbf{b}_i, \quad (i = 1, 2, 3). \quad (7)$$

把(4)式~(6)式代入(7)式可得

$$\mathbf{k}_i = \frac{2\pi}{\lambda} \left( \frac{1}{\sqrt{3}} - \frac{\lambda}{a} b_{ix}, \frac{1}{\sqrt{3}} - \frac{\lambda}{a} b_{iy}, \frac{1}{\sqrt{3}} - \frac{\lambda}{a} b_{iz} \right), \quad (i = 1, 2, 3) \quad (8)$$

根据波矢的归一化可得

$$\frac{\lambda}{a} = \frac{2}{\sqrt{3}} \frac{b_{ix} + b_{iy} + b_{iz}}{b_{ix}^2 + b_{iy}^2 + b_{iz}^2}, \quad (i = 1, 2, 3) \quad (9)$$

(4) 式与(8) 式是形成这种变形面心立方晶格的四束光在感光树脂中的构型。但是，因为激光从空气中斜入射进感光树脂中存在折射现象，我们还要计算四束光在空气中的构型。

进行坐标变换，使感光树脂与空气的介面为  $xy$  平面，中央光束沿  $z$  轴入射。根据斯涅耳定理，设聚合前环氧树脂的折射率为  $n$ ，空气的折射率为  $n_0$ ，可算得四束光在空气中的构型为

$$\mathbf{k}_i = \frac{2\pi}{\lambda_0} \left[ \frac{\sqrt{2}}{2} \frac{\lambda}{2} \frac{n}{n_0} (-b_{ix} + b_{iy}), \frac{\sqrt{6}}{6} \frac{\lambda}{a} \frac{n}{n_0} (-b_{ix} - b_{iy} + 2b_{iz}), \sqrt{1 - \frac{n^2}{n_0^2} \left\{ 1 - \left[ 1 - \frac{\sqrt{3}}{3} \frac{\lambda}{a} (b_{ix} + b_{iy} + b_{iz}) \right]^2 \right\}} \right], \quad (i = 1, 2, 3) \quad (10)$$

$$\mathbf{K}_4 = (2\pi/\lambda_0)(0 \ 0 \ 1), \quad (11)$$

其中  $\lambda_0$  为激光在空气中的波长。

常用的 Epon-SU8 感光树脂在聚合前的折射率  $n=1.6$ , 空气的折射率  $n_0=1$ , 由(10)式和(11)式能计算出制备晶格沿[111]方向拉伸 2.1 倍的变形面心立方结构的四束激光光束构成的伞形分布中, 周围三束光相互间的夹角为  $54.0^\circ$ , 周围三束光与中央光束夹角为  $31.6^\circ$ 。用这种光路和正胶感光树脂可制作该变形面心立方光子晶体模板, 再用此模板制作硅结构, 去除模板, 就能获具有完全光子带隙的三维光子晶体。

## 4 结 论

本文指出以前许多研究小组报道的用伞形的四束激光(周围三束与中央光束成  $38.9^\circ$ 角)直接从空气入射感光树脂的激光全息制作方法制得的结构实际上是一种椭球状格点(长轴沿[111]方向)的晶格沿[111]方向拉伸的变形面心立方结构。研究计算了该结构光子晶体的能带分布, 发现当面心立方晶格沿[111]方向拉伸 1.8~2.3 倍之间和占空比为 10%至 20%之间时, 及当格点材料为硅时, 此结构的蛋白石能产生完全光子带隙。

## 参 考 文 献

- 1 Sajeer John. Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1987, **58**(23): 2486~2489
- 2 Eli Yablonovitch. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1987, **58**(20): 2059~2062
- 3 Li Yanfeng, Hu Minglie, Wang Qingyue. Calculation and design of photonic crystal fibers with zero-dispersion wavelength at 800 nm[J]. *Chin. J. Lasers*, 2003, **30**(5): 427~430 (in Chinese)  
栗岩锋, 胡明列, 王清月. 800 nm 处为零色散的光子晶体光纤的计算与设计[J]. *中国激光*, 2003, **30**(5): 427~430
- 4 Zhu Zhihong, Ye Weimin, Yuan Xiaodong *et al.*. Photonic crystal waveguide directional coupler[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(10): 1237~1240 (in Chinese)  
朱志宏, 叶卫民, 袁晓东 等. 光子晶体波导定向耦合器[J]. *光学学报*, 2003, **23**(10): 1237~1240
- 5 M. Campbell, D. N. Sharp, M. T. Harrison *et al.*. Fabrication of photonic crystals for the visible spectrum by holographic lithography[J]. *Nature*, 2000, **404**(6773): 53~56
- 6 Guangyong Zhou, Michael James Ventura, Min Gu. Two-dimensional near-infrared photonic crystal fabrication by generation of channels in solid resin[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2003, **1**(12): 719~721
- 7 X. Wang, J. F. Xu, H. M. Su *et al.*. Three-dimensional photonic crystals fabricated by visible light holographic lithography[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2003, **82**(14): 2212~2214
- 8 Yu. V. Miklyaer, D. C. Meisel, A. Blanco *et al.*. Three-dimensional face-centered-cubic photonic crystal templates by laser holography: fabrication, optical characterization, and band-structure calculations[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2003, **82**(8): 1284~1286
- 9 Dongbin Mei, Bingying Cheng, Wei Hu *et al.*. Three-dimensional ordered patterns by light interference[J]. *Opt. Lett.*, 1995, **20**(5): 429~431