

晶格数目对面心立方结构光子晶体带隙的影响^{*}

李 蓉¹⁾ 程 阳¹⁾ 崔丽彬¹⁾ 朱 峰¹⁾ 周 静¹⁾ 刘大禾^{1)†} 刘 守²⁾ 张向苏²⁾

1) (北京师范大学物理系, 应用光学北京市重点实验室, 北京 100875)

2) (厦门大学物理系, 厦门 361005)

(2005 年 3 月 30 日收到; 2005 年 5 月 30 日收到修改稿)

对晶格数目对面心立方结构光子晶体带隙的影响进行了详细的实验研究. 用不同厚度的材料制作面心立方结构光子晶体, 并测量了其禁带的光谱特性. 得到了对实际应用有指导作用的规律. 一个可实际应用的光子晶体至少有 50 个晶格.

关键词: 面心立方结构, 光子带隙, 晶格数目

PACC: 4240, 4270Q, 7820P

1. 引 言

高质量光子晶体^[1,2]的制作是光子晶体研究的一个重要内容, 能否制作出可实用的光子晶体关系到光子晶体的实际应用, 是一个迫切需要解决的问题. 在可见光波段, 面心立方结构光子晶体的制作受到了人们的重视. 最初, 是采用各向同性聚苯乙烯或 SiO₂ 小球自排形成面心立方晶体^[3-10], 但其均匀性较差. 尽管对称性某种程度的破坏可以使带隙宽度略有增大. 然而, 若晶体的基本结构被破坏, 则不可能得到预期的禁带. 1997 年以来, 已报道了利用全息方法用光刻胶或光聚合物制作出面心立方结构光子晶体^[11-14]的工作. 但在这些报道中, 只给出了反映几何结构的电镜片, 以及能带的计算结果, 均未给出禁带的光谱测量结果. 而只有光谱测量结果才能真正反映光子晶体的禁带特性. 实际上, 目前可用的光刻胶和光聚合物的膜厚只有 1 μ m 左右. 在这样的厚度上, 只能形成一两个晶格, 不可能产生一个完整的布里渊区. 因此, 无法得到真正的禁带. 要想使光子晶体具有好的禁带, 能够在实际应用中应用, 必须保证具有一定数量的晶格. 本文采用全息方法用光刻胶和不同厚度的重铬酸盐明胶制作了具有不同晶格数目的面心立方结构光子晶体, 并测量了它们的透射光谱特性, 得到光子晶体禁带特性与晶格数目

的关系. 为今后制作可实用的光子晶体提供了一个可供参考的数据.

2. 光子晶体的制作

我们采用 Beiger 等^[11]的方法, 首先制作一个如图 1 所示的母板. 当平行光射到母板上时, 光经三个光栅发生衍射. 中间不经过光栅的透射光与三束衍射光相交. 通过控制光栅常数及光栅的空间方位, 可使三束衍射光之间及与中间透射光之间的角度满足制作面心立方结构的要求. 从而形成面心立方结构的光子晶体. 图 2 为制作光子晶体的光路. 实验中所用的母板是用 1 μ m 厚的光刻胶制作. 所用激光器为 Melis Griot 公司 85-BLT-605 型, 其输出波长为 457.9nm, 输出功率为 400mW, 线宽为 200kHz.

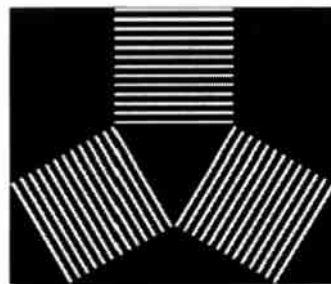


图 1 制作面心立方全息光子晶体的母板

* 国家自然科学基金(批准号: 60277014)资助的课题.

† E-mail: dhlju@bnu.edu.cn

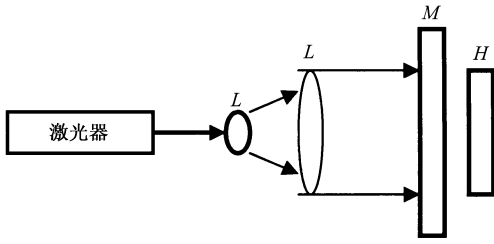


图 2 面心立方结构光子晶体的制作光路

我们所用的记录介质为光刻胶和重铬酸盐明胶 (DCG). 光刻胶的厚度为 $1\mu\text{m}$, 折射率为 1.6. 而重铬酸盐明胶介质, 我们制备了 $12\mu\text{m}$, $36\mu\text{m}$ 和 $60\mu\text{m}$ 三种厚度的干板. 对于用波长为 457.9nm 的光制作的面心立方结构晶体, 其晶格常数为 $1.1\mu\text{m}$. 由此可知, 当用 $1\mu\text{m}$ 厚的光刻胶制作时, 在纵向上只有一个晶格, 不可能形成真正的晶体, 而只是一个二维六方点阵. 图 3 为 $1\mu\text{m}$ 厚的光刻胶制作的六方点阵 (111) 面的电镜片.

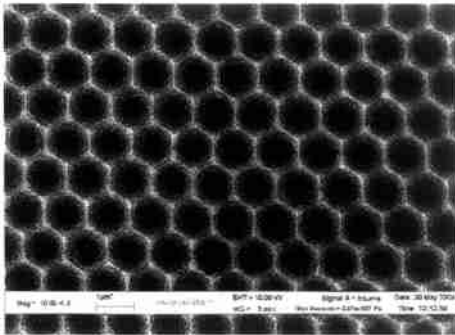


图 3 用 $1\mu\text{m}$ 厚光刻胶制作的二维六方点阵(111)面的电镜片

而对于用 $12\mu\text{m}$, $36\mu\text{m}$ 和 $60\mu\text{m}$ 厚的重铬酸盐明胶干板制作的面心立方结构, 在纵向上可分别有 10 个, 30 个和 50 个晶格, 可以形成真正的光子晶体. 由于重铬酸盐明胶全息图是一种由折射率变化导致的纯位相分布结构, 而没有表面的浮雕结构和介质内部的空隙, 因此, 无法得到电镜片, 只能通过可见光观察. 当用可见光照射时, 折射率的空间变化导致透射光强的空间分布, 由此显示出介质内部的结构. 我们用装有 CCD 相机的 1200 倍显微镜在可见光下观察并拍摄其晶格结构. 图 4 给出了用重铬酸盐明胶介质制作的面心立方结构光子晶体的 (111) 面显微照片. 这是我们所能得到的最大放大倍数的显微照片. 可以看到用重铬酸盐明胶介质制作的光子晶体具有很好的面心立方结构. 图中较大的结构是由

不同方向的光栅之间所形成的莫阿条纹导致的. 为了验证这一点, 我们用显微镜观察了只有一个晶格的用光刻胶制作的光子晶体, 也看到同样的莫阿条纹, 而这样的条纹在电镜片中却没有.

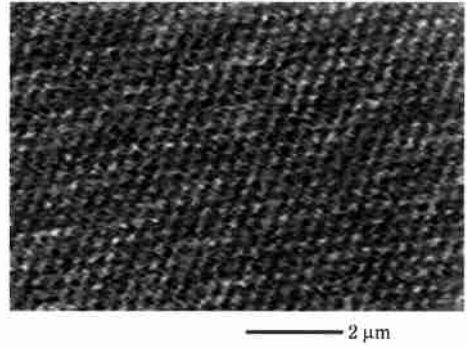


图 4 用重铬酸盐明胶介质制作的面心立方结构光子晶体的显微照片((111)面)

3. 透射光谱的测量与讨论

我们用光栅光谱仪测量上面制作的几个光子晶体的透射光谱. 入射光为白色平行光, 照射到面心立方结构光子晶体的 (111) 面上. 这个 (111) 面就是记录介质的表面, 这由制作时光束的对称性所保证. 光栅的扫描范围是 $400\text{--}800\text{nm}$. 图 5 为四个具有不同晶格数目的面心立方结构光子晶体的透射光谱. 为了便于统一比较各个光子晶体的光谱特性, 我们用每个测量结果中的最大透过率对各自的光谱进行归一化.

由测量结果看到, 对于用 $1\mu\text{m}$ 厚的光刻胶制作的面心立方结构, 由于只有一个晶格, 不能形成光子晶体, 其透射光谱几乎为一条平滑的直线, 没有禁带出现. 而对于用 $12\mu\text{m}$, $36\mu\text{m}$ 和 $60\mu\text{m}$ 厚的重铬酸盐明胶干板制作的面心立方结构, 在纵向上可分别有 10 个、30 个和 50 个晶格, 可以形成真正的晶体. 它们的透射光谱真实地反映了各个光子晶体的光学特性. 当晶体晶格的数目达到 50 个时, 其禁带的深度和宽度都达到了实际应用的要求. 当晶体晶格的数目较少时(如 30 个或 10 个), 其禁带的深度明显减小, 这会直接影响光子晶体的实际使用. 对于具有 10 个晶格的光子晶体, 其禁带的深度很浅, 宽度却较宽. 但这个宽度并不是光子晶体真实的禁带宽度. 当记录介质较薄时, 晶体晶格的数目很少. 由于制作过程中介质的吸收作用, 沿纵向的曝光是不均匀的,

这就使晶体的周期性受到较大程度的破坏. 这是导致晶体晶格数目较少时禁带宽度却明显增大的主要

原因. 随着晶格数目的进一步减少, 禁带将会更浅、更宽, 直至变为一条平滑的直线, 禁带消失.

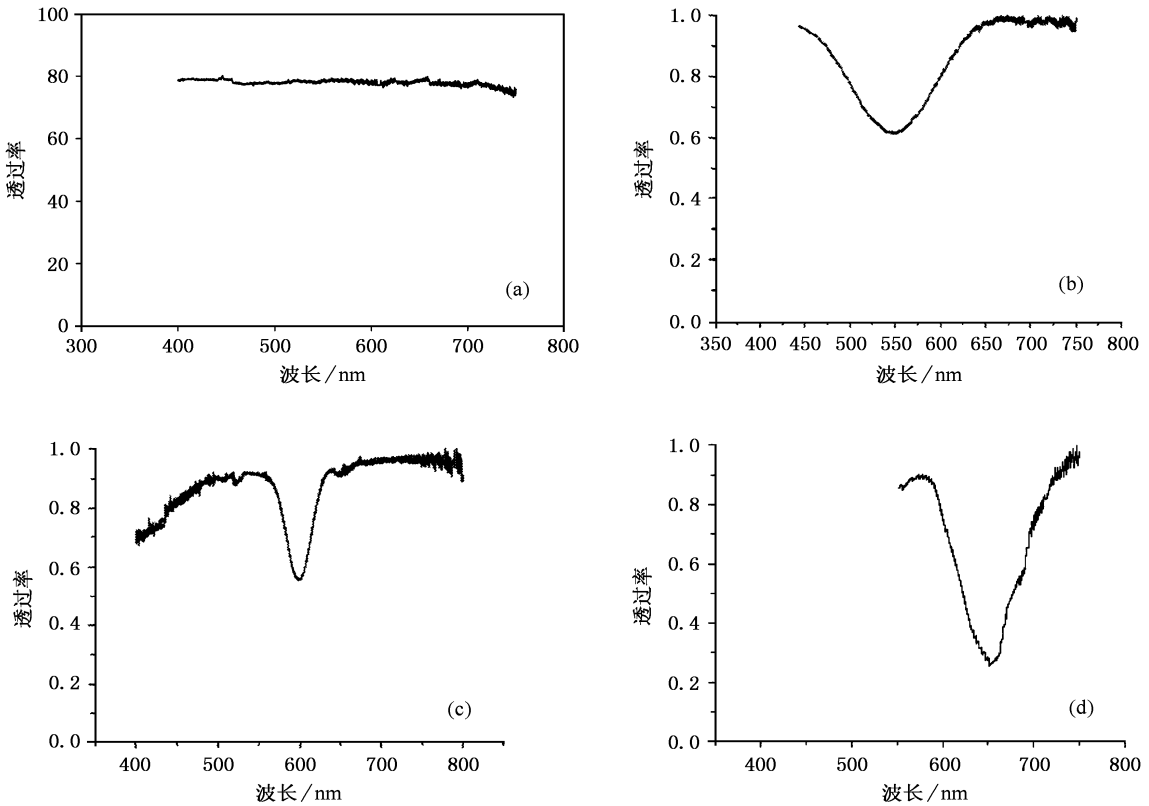


图 5 具有不同数目晶格数目的面心立方结构光子晶体的透射光谱(其中, T 为记录介质的厚度, N 为介质中的晶格数目, θ 为光在 (111) 面上的入射角. 为了便于统一比较禁带的光谱特性, 除(a)外, 其他三个光谱我们都用各自的最大透过率进行了归一化) (a) 光刻胶 $T=1\mu\text{m}$, $N=1$, $\theta=10^\circ$; (b) DCG $T=12\mu\text{m}$, $N=10$, $\theta=5^\circ$; (c) DCG $T=36\mu\text{m}$, $N=33$, $\theta=10^\circ$; (d) DCG $T=60\mu\text{m}$, $N=55$, $\theta=15^\circ$

由图 5 还可以看到, 当光在 (111) 面上的入射角改变时, 禁带的位置是移动的. 这说明, 面心立方结构光子晶体确实不具有全空间的禁带.

由图 5 还看到, 禁带的位置随入射角的增大而移向长波方向. 其原因是通常测量的禁带都是对应于第一布里渊区的, 带隙的位置随入射角的增大而移向短波长方向. 但理论计算表明, 在晶体的第一布里渊区、第二布里渊区、第三布里渊区……都会有相应的禁带. 根据本文的实验条件, 经计算得到我们制作的光子晶体的第一布里渊区的边界在 $\lambda=1.470\mu\text{m}$ 处, 第二布里渊区的边界在 $\lambda=735\text{nm}$ 处, 第三布里渊区的边界在 $\lambda=447\text{nm}$ 处. 由于我们关心及测量的是可见光范围(即 400—800nm), 测量的禁带实际上对应于第二布里渊区. 而第二布里渊区与第一布里渊区带隙的移动方向刚好是相反的. 这是在测量时带隙位置随入射角的增加移向长波的原因. 图 5(b)、(c) 和 (d) 是用不同厚度 DCG 材料制作

的. 由于制作和处理过程中产生的误差, 造成不同厚度的光子晶体在入射角相同时带隙的位置会有差别. 在测量中, 每一种厚度的光子晶体其带隙位置都是随入射角的增加移向长波方向的. 厚度为 $36\mu\text{m}$ 和 $60\mu\text{m}$ 的光子晶体, 带隙的位置基本相同. 而厚度为 $12\mu\text{m}$ 的光子晶体其带隙位置与前两种相差较大. 这是由于 $12\mu\text{m}$ 的厚度包含的晶格数目较少, 从而对第二布里渊区甚至整个光子晶体的性质有较大影响.

4. 结 论

一个可实际应用的光子晶体必须具有足够的晶格数目. 否则, 不能形成好的禁带. 由上述实验结果及讨论可以知道, 一个光子晶体要达到实用的目的, 应至少必须具有 50 个晶格.

- [1] Yablonovitch E 1987 *Phys. Rev. Lett.* **58** 2059
- [2] John S 1987 *Phys. Rev. Lett.* **58** 2486
- [3] Yablonovitch E, Gmitter T J 1989 *Phys. Rev. Lett.* **63** 1950
- [4] Leung K M, Liu Y F 1990 *Phys. Rev. Lett.* **65** 2646
- [5] Tarhan I I, Wilson H G 1996 *Phys. Rev. Lett.* **76** 315
- [6] Mei D B, Liu H Q, Cheng B Y, Li Z L, Zhang D Z, Dong P 1998 *Phys. Rev. B* **58** 35
- [7] Mei D B, Dong P, Liu H Q, Cheng B Y, Zhang D Z 1998 *Chin. Phys. Lett.* **15** 77
- [8] Li Z L, Ni P G, Cheng B Y, Jin C J, Zhang D Z 2000 *Chin. Phys. Lett.* **17** 112
- [9] Chan Y S, Chan C T, Lin Y Z 1998 *Phys. Rev. Lett.* **80** 956
- [10] He Y J, Su H M, Tang F Q, Dong P, Wang H Z 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 892 (in Chinese) [何拥军、苏惠敏、唐芳琼、董鹏、汪河洲 2001 物理学报 **50** 892]
- [11] Berger V, Gauthier-Lafaye Q, Costard E 1997 *J. Appl. Phys.* **82** 60
- [12] Campbell M, Sharp D N, Harrison M T, Denning R G, Turberfield A J 2000 *Nature* **404** 53
- [13] Su H M, Zheng X G, Wang X, Xu J F, Wang H Z 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 1044 (in Chinese) [苏惠敏、郑希光、王霞、许建峰、汪河洲 2002 物理学报 **51** 1044]
- [14] Zheng J, Ye Z C, Tang W G, Liu D H 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 2148 (in Chinese) [郑君、叶志成、唐伟国、刘大禾 2001 物理学报 **50** 2148]

Effect of number of unit cells of fcc photonic crystal on property of band gaps^{*}

Li Rong¹⁾ Cheng Yang¹⁾ Cui Li-Bin¹⁾ Zhu Feng¹⁾ Zhou Jing¹⁾ Liu Da-He^{1)†} Liu Shou²⁾ Zhang Xiang-Su²⁾

1) (Department of Physics, Applied Optics Beijing Area Major Laboratory,
Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

2) (Department of Physics, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

(Received 30 March 2005; revised manuscript received 30 May 2005)

Abstract

The effect of number of unit cells of the fcc photonic crystals on the property of the band gaps was investigated experimentally. Fcc photonic crystals with different numbers of cells were fabricated by using recording materials of different thickness in holography. Their transmitted spectra of the band gaps were measured. A guiding rule was given: a photonic crystal which can be practically used should have 50 unit cells at least.

Keywords: fcc structure, photonic band gaps, number of lattice

PACC: 4240, 4270Q, 7820P

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60277014).

[†] E-mail: dhliu@bnu.edu.cn