

# 硅基两维光子晶体的制备和光子带隙特性\*

周 梅 陈效双† 徐 靖 陆 卫

(中国科学院上海技术物理研究所红外物理国家重点实验室, 上海 200083)

(2003 年 12 月 27 日收到, 2004 年 2 月 6 日收到修改稿)

利用反应离子束刻蚀设备制备了硅基的两维空气柱光子晶体, 并用红外显微镜测试了样品的反射谱. 理论上用时域有限差分(FDTD)方法计算了样品的光子带隙, 从测试结果看光子带隙和理论计算的光子带隙符合得很好.

关键词: 光子晶体, 光子带隙, 反射谱, 时域有限差分方法

PACC: 7820P, 4270Q

## 1. 引 言

近年来, 无论在理论方面还是在实验方面光子晶体引起人们极大的兴趣. 电磁波和周期性的介质或金属材料相互作用就类似于电子在晶体中的运动, 会出现类似电子能带的光子能带即光子带隙<sup>[1]</sup>. 因为具有光子带隙这一特性导致了光子晶体广阔的应用前景. 前期的大量工作比较关注三维光子晶体能带的理论计算和实验制备. 但随着人们研究的深入发现三维光子晶体的理论计算需耗费很多时间而且用现存的微细加工技术制备也很困难尤其是禁带在红外和可见光波段的三维光子晶体<sup>[2-4]</sup>. 在两维的情况下, 电磁波可以被分解为电场(TM)和磁场(TE)两种独立极化模式, 对每一种极化模式只要电磁波在任何方向不能传播就形成了此种极化模式的禁带. 所以通过调节各种参数, 两维的光子晶体较三维光子晶体更容易得到光子禁带, 而且和现有的半导体工艺相结合更易实现两维光子晶体的制备<sup>[5]</sup>. 同时, 两维光子晶体有很多重要的应用, 比如, 两维光子晶体用做光纤覆层、激光器中的反馈镜等. 制备两维光子晶体大多采用精细加工方法, 因其稳定可靠而且以半导体工业成熟的技术作为基础. 其中包括光刻蚀术, 电子束刻蚀术, 反应离子束刻蚀术等<sup>[6-8]</sup>. 因此研究两维光子晶体具有实际的

意义和重大的应用价值.

对两维而言, 完全光子带隙是 TM 和 TE 两者极化模式带隙的重叠部分. 带隙重叠经常出现在第一、第二 TE 极化模式带隙和更高阶的 TM 极化模式带隙的叠加处, 所以对于一个具体的格子, 很难给出简单的论据预言是否存在完全带隙<sup>[9]</sup>. 总结了前人许多两维格子的理论研究后, 人们得出了一些结论: 在一定的介质背景下, 空气圆柱或方柱组成的三角格子出现了完全带隙, 由空气圆柱组成的三角格子出现了最大带隙. 而对于正方格子, 出现完全带隙的条件是介质背景下的空气柱(圆柱或方柱)<sup>[10]</sup>. 所以对于由这两种格子组成的光子晶体还是很有研究的必要.

本文采用了反应离子束刻蚀术制备了硅基的, 光子带隙在红外波段, 两维正方格子光子晶体, 并用微区测试的手段研究了其光谱性质.

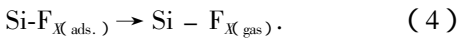
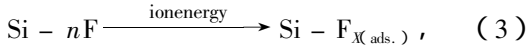
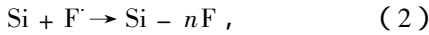
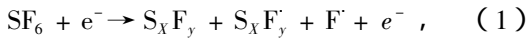
## 2. 样品的结构和制备

反应离子束刻蚀是微机械领域较常用的一种刻蚀方法. 因为反应离子束刻蚀方法对刻蚀材料的晶向没有依赖关系, 只需涂胶光刻这一工艺过程就可以进行刻蚀了, 不需要各种各样的掩膜层, 以及刻蚀掩膜层所带来的刻蚀图形的变形, 而且高深宽比例大于等于 25:1. 光子晶体的制备尤其是硅基光子晶

\* 国家重点基础研究发展规划(973)批准号: 2001CB61040, 中国科学院“百人计划”基金(批准号: 200012), 国家自然科学基金重点项目(批准号: 10234040)和上海科学技术委员会重点基金项目(批准号: 02DJ14066)资助的课题.

† E-mail: xschen@mail.sitp.ac.cn; 电话: 021-65420850-24309.

体的制备和现在的半导体工艺紧密联系的,而且反应离子刻蚀方法具有以上的优点,所以在本论文中采用了此方法来制备样品.下面的流程图是反应离子刻蚀方法的原理:



刻蚀过程是有刻蚀和钝化两个过程相互交替完成的.刻蚀所用的气体是六氟化硫,钝化所用的气体  $C_4F_8$ . 上面的流程图中(1)式表示六氟化硫气体提供刻蚀过程氟离子根(2)式是氟离子根和硅原子发生反应.(3)式是从耦合平面电极中发出的定向离子能量移走钝化物质,使钝化和刻蚀达到一个平衡.关于制备过程和反应机理在文献[11]中有详细地描述.实验中采用的是电阻为  $30\Omega/\text{cm}^2$ ,厚度为  $100\mu\text{m}$  的中阻硅片,介电常数是 11.56.图1是制备的两维正方格子的俯视光学显微照片,放大倍数为 1000 倍.图2是扫描显微镜侧视图,放大倍数都为 1500 倍.如图中所标晶格常数为  $12\mu\text{m}$ ,空气柱孔径  $8\mu\text{m}$ .我们刻蚀的样品深度是  $80\mu\text{m}$ ,也就是空气柱的长为  $80\mu\text{m}$ .众所周知,光子晶体的光子带隙不仅仅和格子结构、介电常数、填充比等主要的因素有关,通过 Sigalas 等人对无序的研究发现,散射元的无序会引起光子带隙的变形甚至消失,所以光子带隙的分布也与体系的无序度有关.从图2可以看出我们制备样品的孔径非常均匀,这样就降低了因孔径无序对光子带隙的影响.

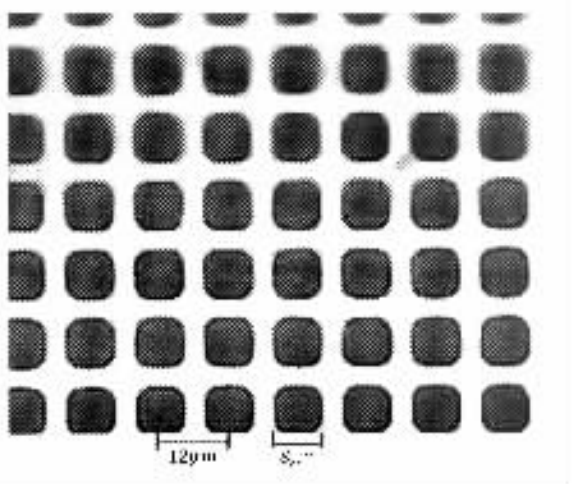


图1 样品显微照片俯视图(放大倍数为 1000 倍)

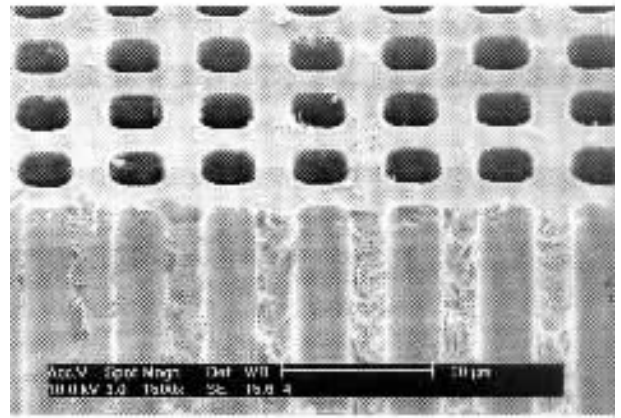


图2 样品扫描显微镜照片的侧视图,放大倍数为 1500 倍

### 3. 理论模拟和测试结果

理论上,用文献[12,13]中描述的时域有限差分方法(FDTD)计算了在实验中制备的正方格子的能带.FDTD方法的中心思想是用离散时间和空间变量的差分方程近似的替代连续的时间和空间变量的微分方程,同时保持原方程的物理意义,并具有相当高的精度<sup>[14]</sup>.正方格子的布里渊区如图3(a)的插图所示.沿着  $\Gamma X$  方向的光子能带理论计算结果列于图3(a).纵坐标的单位是归一化频率  $\omega a/2\pi c$ ,其中  $\omega$  为频率, $a$  为晶格常数, $c$  为真空中的光速.沿着  $\Gamma X$  方向上有一个带隙在 0.1745 到 0.2111 之间,带宽为 0.0366,是带隙中心频率的 19%.沿着  $\Gamma X$  反射光谱理论计算如图3(b)灰线所示,其中实线为

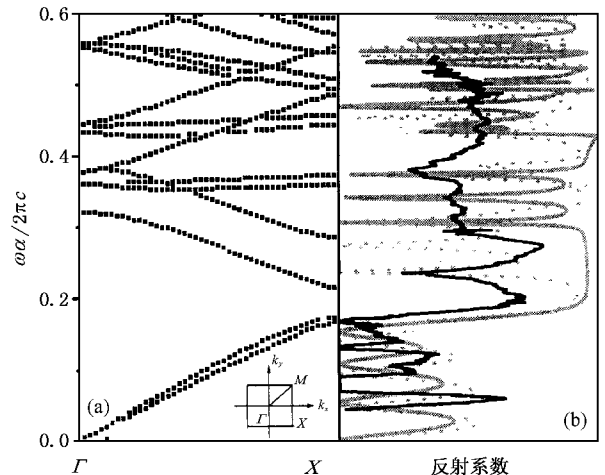


图3 样品沿  $\Gamma M$  方向的能带图和反射光谱图(实线为 TM 极化,点线为 TE 极化,灰色线为理论计算,黑色为实验测量值)

TM 极化波, 点线为 TE 极化波, 这两个极化波的叠加带为光子带隙, 与光子能带计算中得到的禁带位置一致, 约化中心频率大约为 0.1926.

采用 Necolet 公司的 Continuum 红外显微镜测量了样品的反射谱, 所用探测器为碲镉汞探测器. 测试范围为  $650\text{cm}^{-1}$ — $4000\text{cm}^{-1}$  ( $2.5$ — $15\mu\text{m}$ ), 扫描步长为  $4\text{cm}^{-1}$ . 样品的大小为  $100\mu\text{m} \times 500\mu\text{m}$ , 照射到样品上的光斑尺寸为  $50\mu\text{m} \times 50\mu\text{m}$ . 样品固定在一片铜片上, 这样减少外界的散射光直接返回到探测器上相应地减少了测量中的噪声. 无论用什么类型的红外测试仪器来测量, 样品的尺度必须大于光斑的直径而且还必须保证光不会直接穿过样品架到达探测器. 普通的红外测试仪器的光斑直径一般都在  $2$ — $3\text{mm}$ . 而硅片的厚度都小于这个尺寸, 所以大多数的测试实验采取将蚀刻好的一定尺寸的样品粘和叠加起来. 这样多少会带来一些测量准确性的问题. 测试样品的装置和一般红外测试不一样的就是在光源和样品之间加了一个显微镜, 这样就可以控制光源的尺寸, 由此就避免了上述问题. 图 3(b) 中黑线标示沿着  $\Gamma X$  方向的反射谱测试结果. 从图中可以看出在约化频率 0.193 和 0.27 的位置明显观察到反射极大值, 只有在 0.193 的位置和理论计算

符合得很好, 说明在这个位置存在一光子带隙, 带隙宽度和理论计算几乎相同, 比较符合. 但在 0.27 位置的反射极大没有在计算能带图中找到很好的对应, 在实验上看到了一带隙. 对于反射谱, 其反射系数的值在禁带位置应该达到任意单位 1. 然而在测量中没有达到理论计算中的数值. 探测器的灵敏度不够和测试样品表面的不够平整引起反射谱中的噪声.

从以上的论述可看到反应离子束刻蚀的方法是一种可以用来制备  $10\mu\text{m}$ , 甚至更小尺寸二维光子晶体可行性的方法. 而且它可以提供实现理论上设计的各种不同光子晶体结构的可能性.

## 4. 结 论

利用反应离子束刻蚀设备, 成功地制备了二维正方格子的光子晶体. 采用红外显微镜测试了样品的反射谱, 这种方法的优点在于较少受到样品尺寸的限制. 证实了在  $\Gamma X$  方向上有较大的光子带隙. 实验结果和理论计算符合得很好, 说明了制备的样品具有很高的质量.

- 
- [ 1 ] Yablonovitch E 1987 *Phys. Rev. Lett.* **58** 2059
  - [ 2 ] Lin S Y 1998 *Nature* **394** 251
  - [ 3 ] Özbay E, Michel E, Tuttle G, Biswas R, Sigalas M and Ho K M 1994 *Appl. Phys. Lett.* **64** 2559
  - [ 4 ] Wada M, Doi Y, Inoue K, Haus J W and Yuan Z 1997 *Appl. Phys. Lett.* **70** 2966
  - [ 5 ] McCall S L, Platzman P M, Dalichaouch R, Smith D and Schultz S 1991 *Phys. Rev. Lett.* **67** 2017
  - [ 6 ] Krauss T, Rue R, De L and Band S 1996 *Nature* **383** 699
  - [ 7 ] Brüning U, Lehmann V, Ottow S and Busch K 1996 *Appl. Phys. Lett.* **68** 747
  - [ 8 ] Lin H B 1996 *Appl. Phys. Lett.* **68** 1927
  - [ 9 ] Sakoda K 1995 *Phys. Rev. B* **51** 4672
  - [ 10 ] Agio M and Andreani L C 2000 *Phys. Rev. B* **61** 15519
  - [ 11 ] Mansano R D, Verdonck P and Maciel H S 1998 *Sensors Actuators A* **65** 180
  - [ 12 ] Ward A J and Pendry J B 2000 *Computer Physics Communications* **128** 590
  - [ 13 ] Ward A J and Pendry J B 1998 *Computer Physics Communications* **112** 23141
  - [ 14 ] Xiao S S, Shen L F and He S L 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 2858 (in Chinese) [肖三水、沈林放、何赛灵 2002 物理学报 **51** 2858]

# Fabrication and photonic band gap property of the two-dimensional square lattice based on silicon<sup>\*</sup>

Zhou Mei   Chen Xiao-Shuang<sup>†</sup>   Xu Jing   Lu Wei

( *National Laboratory for Infrared Physics , Shanghai Institute of Technical Physics , Chinese Academy of Sciences , Shanghai 200083 , China* )

( Received 27 December 2003 ; revised manuscript received 6 February 2004 )

## Abstract

Two-dimensional air-cylinder photonic crystals were fabricated based on silicon by using the multiplex inductively coupled plasma system supplied by STS company. Photonic band gap was theoretically calculated by using the finite different time domain ( FDTD ) method , and the reflection spectrum was measured experimentally using the microscope infrared spectrometer instrument . We find that the reflection measurements are in good agreement with the theoretically expected behaviour .

**Keywords** : photonic crystal , photonic band gap , reflection spectrum , FDTD

**PACC** : 7820P , 4270Q

---

<sup>\*</sup> Project supported by the State Key Development Program for Basic Research of China( Grant No. 2001CB61040 ) , the “ Hundred-Talent Project ” of Chinese Academy of Sciences( Grant No. 200012 ) , Key Fund of Chinese National Natural Science Foundation of China( Grant No. 10234040 ) and Key Fund of Shanghai Science and Technology Foundation( Grant No. 02DJ14066 ) .

<sup>†</sup> Corresponding author : E-mail : xschen@mail.sitp.ac.cn ; Tel : 021-65420850-24309 .