

部分空气桥式硅膜二维光子晶体^{*}

田 洁¹⁾ 韩守振¹⁾ 程丙英¹⁾ 李志远¹⁾ 冯 帅¹⁾ 张道中¹⁾ 金爱子²⁾

¹⁾中国科学院物理研究所和凝聚态物理中心光物理开放实验室,北京 100080)

²⁾中国科学院物理研究所,微加工实验室,北京 100080)

(2004 年 6 月 1 日收到,2004 年 8 月 10 日收到修改稿)

描述在 Si 基底上制备带隙在近红外波段部分空气桥式二维光子晶体(PC).选用 HF 酸溶液作为腐蚀液,利用聚焦离子束刻蚀技术直接刻蚀出具有三角形空气洞结构的二维 PC,并测出了二维 PC 完整的第一带隙透过谱的带隙范围为 1.23—1.55 μm .实验测得的透过谱与理论计算的空气桥式二维 PC 的计算结果一致.类 TM_0 模的存在减小了带隙的宽度.由于部分 SiO_2 支撑桥式平板,二维 PC 易于按所需尺寸进行制备.同时,通过改变平板下的支撑材料,可以制出有源的 PC.利用这种机理可以把光从支撑材料中引出.

关键词:二维光子晶体,带隙,平板波导

PACC:4265K,4225B,4240M

1. 引言

近年来,二维光子晶体(PC)因其存在光子带隙而日益引起人们的兴趣^[1,2].二维结构中,在半导体异质结构中制备具有周期性空气柱排列的波导 PC 平板最受关注.因这种 PC 平板尤其适用于发展超小型化平面光子回路.把二维周期性结构的图形刻蚀到一个传统的平板波导上,同时利用全反射在垂直方向上限制光^[3,4].根据平板波导介电常数的比,可以把 PC 平板划分成以下两种主要类型:低折射反差比 PC 平板^[3,5]和高折射比 PC^[6,7]平板.目前对于高折射比的关心在于这种平板波导能够支持无损模.高折射比的 PC 平板又可分为非对称 PC 平板波导和对称 PC 平板波导.典型的非对称 PC 平板波导是在传统的 SOI(silicon-on-insulator)上制备二维结构的 PC,PC 平板上下覆盖层分别为 SiO_2 层和空气层^[8].使穿孔后的薄膜自由悬浮在空气中,就可实现对称的 PC 平板,例如空气桥式(air-bridge)PC 平板^[7,9,10].平板上下的背景介质均为空气.但是这种空气桥式 PC 平板会受到尺寸的限制,空气桥平板的长度越长,平板越容易弯曲或塌陷,平板的非平性直接影响 PC 的光学特性.为了能够制备大尺寸的

二维 PC,在本实验中通过控制 HF 溶液腐蚀 SiO_2 的时间,选择性地腐蚀掉平板下部分支撑物,留有部分 SiO_2 来支撑平板,此方法构建出的部分空气桥式(partial air-bridge)平板波导可以按照任意所需尺寸制备 PC 器件.本实验表明,测量所得的部分桥式结构 PC 的带隙位置与理论计算出的空气桥式二维 PC 的带隙位置基本符合.同时,如果改变平板下支撑物的材料,可以制备出有源的二维 PC,为向利用 PC 制备微型激光器迈出了重要的一步.

聚焦离子束(FIB)刻蚀可以在两小时或更少的时间内直接在样品表面按已设计好的结构直接写出二维 PC,适合于实验研究. FIB 刻蚀过程为将一束高度会聚的 Ga^+ 聚焦在样品表面,然后样品表面会被 Ga^+ 离子融化而留下凹凸的图形. FIB 刻蚀几乎不受材料的限制,只是依不同的材料选择不同的刻蚀速率和图形.由于其速度和灵活的特点,使得 FIB 刻蚀技术制备二维 PC 颇具吸引力.

2. 实 验

用化学气相沉积(CVD)技术生长的 SOI 片, SiO_2 的厚度为 1.0 μm ,最表面的非晶硅层厚度为 1.0 μm ,利用 FIB 刻蚀技术去掉部分表面非晶硅,最后 Si 膜

^{*} 国家重点基础研究发展规划项目(批准号:2001CB610402)和国家自然科学基金(批准号:60345008)资助的课题.

的厚度为 $0.27\mu\text{m}$. Si 膜的厚度满足波长 $1.55\mu\text{m}$ 的波在波导中的单模传输条件. 实验研究的样品如图 3(a) 所示具有三角晶格周期结构的二维 PC 平板. 晶格常数和空气孔的半径分别为 0.42 和 $0.12\mu\text{m}$. 通过平面波展开法计算出的带隙范围为 $1.3\text{—}1.6\mu\text{m}$.

样品的加工过程为首先用 FIB 刻蚀技术在 SOI

上刻蚀出桥式波导. 用 HF 酸溶液, 通过控制腐蚀的时间, 欲作图形的桥式平板 Si 膜下的 SiO_2 层被部分腐蚀掉, 仍留有部分 SiO_2 支撑平板. 图 1(b) 是在平板下仍有部分 SiO_2 , 空气孔下白色部分为 SiO_2 支撑层. 图 1(a) 为 PC 平板下的 SiO_2 层完全被腐蚀掉.

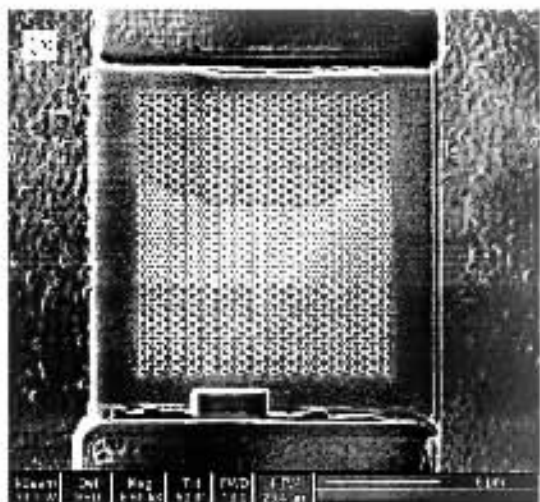
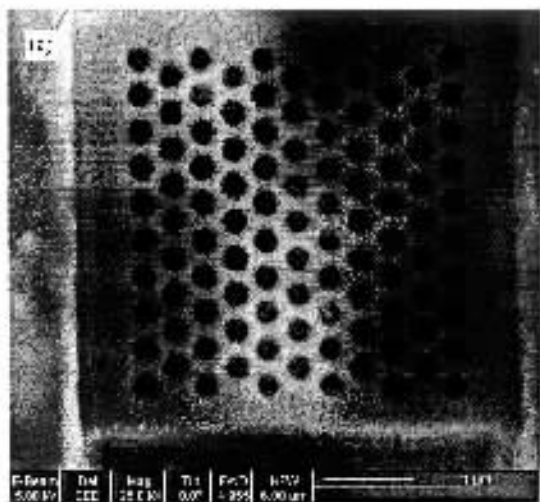


图 1 控制 HF 酸腐蚀平板波导下 SiO_2 的时间, 制备半桥式二维 PC (a) 为平板波导下的 SiO_2 完全被腐蚀掉 (b) 为部分 SiO_2 被腐蚀掉, 中间白色部分为 SiO_2 层

实验中选用功率为 50W 的卤灯作为光源, 选用卤灯的主要原因在于以前所做的实验采用的激光器总有一定的波长范围, 此次制备出的样品带隙范围为 $1.3\text{—}1.6\mu\text{m}$, 卤灯的发光范围可以从可见光到近红外波段. 使用卤灯不但可以测得光子晶体完整的带隙透过谱, 并且还可以在未知带隙位置时确定带隙的具体位置. 光源经过偏振片后被一红外物镜会聚到 PC 样品上, 用另一物镜放在样品后面, 用于接收光信号. 数据采集系统由一台计算机控制的光谱仪和一个探测器组成. 一个完全相同的没有 PC 样品用来校准透过率.

3. 结果与讨论

图 1(b) 和图 2 是利用 FIB 刻蚀技术在非晶硅膜上“直接写出”具有空气柱呈三角形晶格结构的样品. 图 1(b) 是样品正面 SEM 图. 从图 1(b) 可看出, 中间白色的不规则形状物为 SiO_2 层, 其他衬底黑色的部分为空气层.

由图 3(a) 可见, 在接近样品端面部分, PC 平板下的 SiO_2 层被腐蚀掉, 此时平板的上下覆盖层均为

空气层. 图 3(b) 是测量样品正面放大 SEM 图.

由 Kawai 等人利用钛蓝宝石激光器和光电探测器直接测得空气桥式 PC 的带隙范围为 $860\text{—}960\text{nm}$ ^[7]. 图 3(a) 中实线为本实验测得的样品完整的带隙透过谱, 带隙范围为 $1.23\text{—}1.55\mu\text{m}$, 探测器的扫描范围为 $1.0\text{—}1.65\mu\text{m}$. 其中 Si 膜、 SiO_2 层和空气层的折射率分别为 3.4 , 1.4 和 1.0 , PC 的晶格常数和孔的半径分别为 $a = 0.42\mu\text{m}$, $r = 0.12\mu\text{m}$, 平板的厚度 $h = 0.27\mu\text{m}$. 图 3(a) 中虚线是利用 FDTD 方法计算不同 Si 的折射率的对称 PC 平板带隙透过谱. 图 3(b) 为用平面波展开法分别计算的对称平板二维 PC 的带隙透过谱. 如图 3(b) 对于对称平板的二维 PC 计算出的带隙范围为 $1.27\text{—}1.6\mu\text{m}$. 由图 3 可见, 测量值较理论值向短波方向移动, 因为在本实验使用的 SOI 片是利用 CVD 技术生长的, CVD 技术生长的 Si 致密性要比单晶 Si 的致密性小, 所以本实验中 Si 薄膜的折射率要小于 3.4 . 带隙宽度较理论计算的带隙宽度变窄, 因为对于本实验中的样品, PC 平板下面仍留有部分 SiO_2 , 即在本样品中在中间部分为非对称结构的 PC 平板, 在非对称结构中存在类 TM_0 模, 类 TM_0 模的存在是减小带隙宽度的主

要原因^[11].由此可以表明虽然在平板下留有部分支撑物,但是这对带隙的位置影响不大,仍可以对其按

空气桥式平板二维 PC 的性质进行分析.

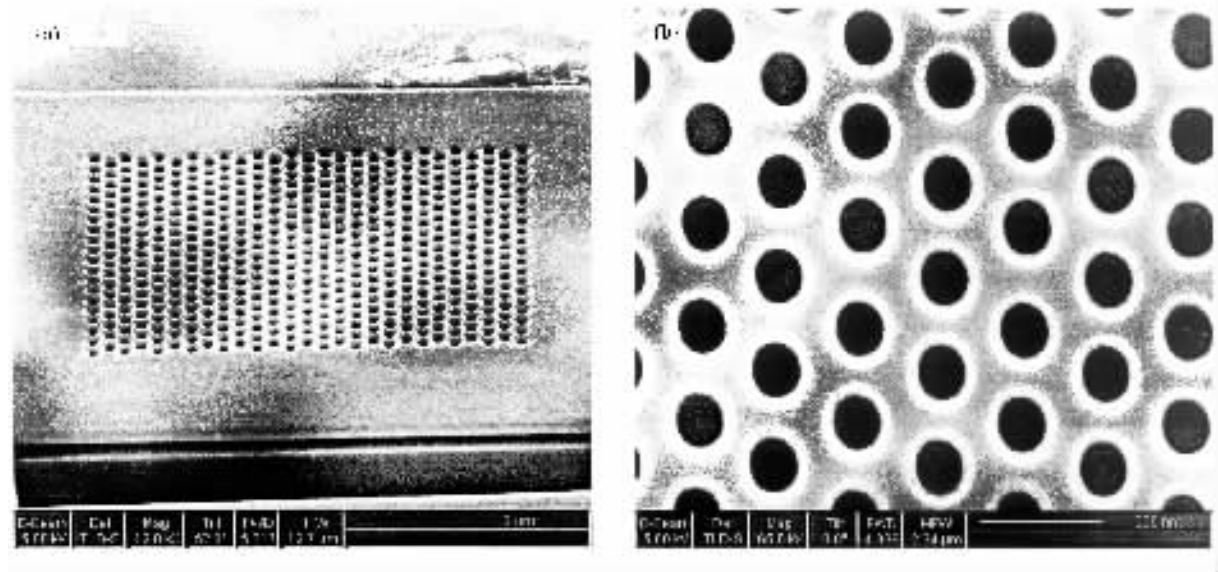


图 2 晶格结构样品图 (a)为样品在电子显微镜下倾转 52°所作的 SEM 图 (b)为样品正面放大 SEM 图

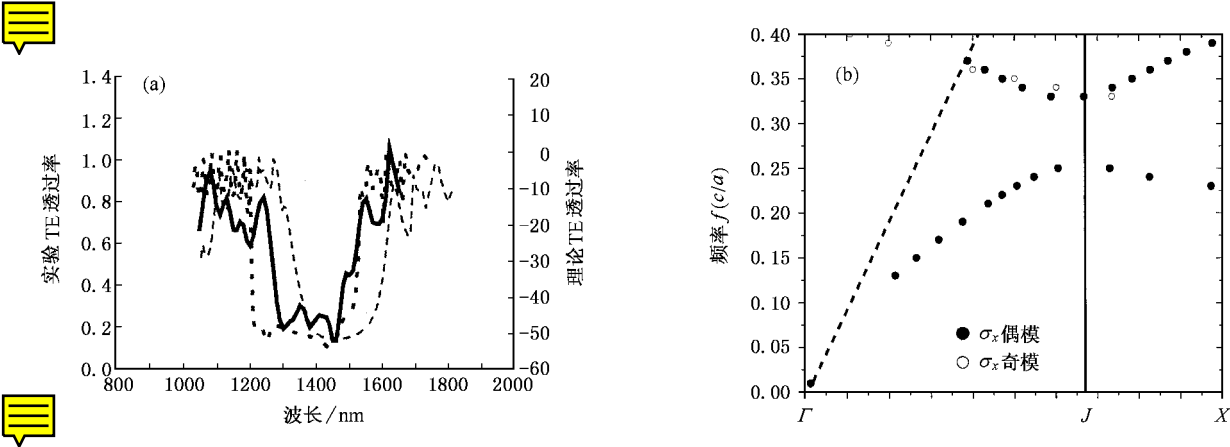


图 3 理论值与测量值的比较 (a)中虚线为采用 FDTD 方法的计算值,其中 Si 的折射率分别为 3.4(破折号)和 3.1(点线),实线为实验测得的二维部分桥式 PC 透过谱 (b)为用平面波展开法计算的对称平板(空气桥式)波导二维 PC 透过谱

4. 结 论

本实验成功制备出部分空气桥式平板二维 PC.测出了二维平板 PC 完整的带隙透过谱,带隙范围为 1.23—1.55 μm .虽然样品平板下面留有部分 SiO₂ 层,但是带隙位置与空气桥式二维 PC 的带隙位置

基本符合.由于平板下留有部分 SiO₂ 作为支撑物,从根本上解决了无法制备大尺寸的空气桥式二维平板 PC 的问题,更重要的是,将来如果改变平板下支撑物的材料,例如把 SiO₂ 变成一种可发光的材料,就可以制成主动式 PC,这种类型的 PC 非常适用于制备微型激光器.

[1] Johnson S G , Fan S , Villeneuve P R , Joannopoulos J D and Kolodziejski L A 1999 *Phys. Rev. B* **60** 5751

[2] Feng Z F , Wang Y Q , Xu X S , Jiang S L , Hao W , Cheng B Y and Zhang D Z 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 6X in Chinese [冯志芳、王义

全、许兴胜、江少林、郝伟、程丙英、张道中 2004 物理学报 **53** 62]

[3] Krauss T F , De La Rue R M and Rand S 1996 *Nature* **383** 699

[4] Meade R D , Devenyi A , Joannopoulos J D , Alerhand O L , Smith D A and Kash K 1994 *J. Appl. Phys.* **75** 4753

[5] Benisty H *et al* 1999 *J. Lightwave Technol.* **17** 2063

[6] Chow E , Lin S Y , Johnson S G , Villeneuve P R , Joannopoulos J D , Wendt J R , Vawte G A , Zubrzycki W , Hou H and Alleman A 2000 *Nature* **407** 983

[7] Kawai N , Ionoue K , Carlsson N , Ikeda N , Sugimoto Y , Asakawa K and Takemori T 2001 *Phys. Rev. Lett.* **86** 2289

[8] Bennici E , Ferrero S , Giorgis F , Pirri C F , Rizzoli R , Schina P , Businaro L and Fabrizio E 2002 *Physica E* **16** 539

[9] Painter O J , Husain A , Scherer A , Brien J D O , Kim I and Dapkus P D 1999 *J. Lightwave Technol.* **17** 2082

[10] Akahane Y , Asano T , Song B S and Noda S 2003 *Appl. Phys. Lett.* **79** 2690

[11] Qiu M 2002 *Phys. Rev. B* **66** 33103

Two-dimensional silicon-based photonic crystal slab with partial air-bridge^{*}

Tian Jie¹⁾ Han Shou-Zhen¹⁾ Cheng Bing-Ying¹⁾ Li Zhi-Yuan¹⁾ Feng Shuai¹⁾ Zhang Dao-Zhong¹⁾ Jin Ai-Zi²⁾

¹⁾*Ch Laboratory of Optical Physics , Institute of Physics and Center for Condensed Matter Physics , Chinese Academy of Sciences , Beijing 100080 ,China)*

²⁾*Ch Laboratory of Micro Fabrication and Institute of Physics , Chinese Academy of Sciences , Beijing 100080 , China)*

(Received 1 June 2004 ; revised manuscript received 10 August 2004)

Abstract

We describe the fabrication process of a two-dimensional silicon-based photonic crystal (PC) slab with partial air-bridge , which has a photonic band gap in the near-IR range . The process involves the formation of the air-bridge silicon slab by wet etching and the fabrication of periodic air holes by a focused ion beam. We successfully obtained such a sample and measured its transmission in a wide spectrum. It is found that the observed spectrum is consistent with the theoretical values calculated by the plane wave expansion method. The TM₀-like modes reduce the size of the band gap , and the partial air bridge is beneficial to the fabrication of large PC slabs. Meanwhile , it is possible to draw light out from the supporting material of the air bridge.

Keywords : two-dimension PC , band gap , waveguide slab
PACC : 4265K , 4225B , 4240M

^{*} Project supported by the State Key Development Program for Basic Research of China (Grant No. 2001CB610402) , and the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60345008).