

二维平板光子晶体直波导的制备和 光传输特性的测量*

韩守振[†] 田 洁 冯 帅 任 承 李志远 程丙英 张道中

(中国科学院物理研究所, 北京 100080)

(2005 年 4 月 19 日收到, 2005 年 6 月 10 日收到修改稿)

利用聚焦离子束刻蚀的方法在 SOI (silicon on insulator) 基片上制备了 W3 型二维光子晶体直波导. 观察并测量了近红外激光通过光子晶体波导的散射图形和透过谱. 实验结果说明, 激光在有引入引出脊形波导的光子晶体直波导中具有很好的传输特性.

关键词: 光子晶体波导, 光子带隙, 脊型波导

PACC: 4265K, 4225B, 4270Q

1. 引 言

二维平板式光子晶体是未来大规模高密度光子集成回路的基础. 利用光子晶体的点缺陷和线缺陷可以制成损耗很小的光子晶体直波导、弯波导、光子晶体滤波器、波分复用器等光子晶体器件^[1-14]. 在平板上打孔的光子晶体中去掉一行圆孔而形成的光子晶体直波导称为 W1 型波导. 光在这种波导中是以单模传输的, 从而成为人们研究最多的波导类型之一. 但是 W1 型波导的宽度很窄, 光耦合到波导的效率很低, 用其制成光子晶体器件还较困难. 而在光子晶体中去掉三行圆孔而形成的 W3 型光子晶体波导虽然在模拟计算中是允许多模传输的, 但可以大大提高激光耦合到波导中的效率^[15, 16]. 而且利用 W1 型波导能够实现的功能很多也能够用 W3 型波导实现, 从而使用 W3 型波导制成光子晶体器件具有了独特的功能. 本文从实验上测量了 W3 型光子晶体直波导的透过谱以及激光通过 W3 型光子晶体波导的引出波导后的强度分布. 实验证明, 激光通过 W3 型平板光子晶体直波导经由脊形波导引出后具有很好的传输特性.

2. 实 验

平板光子晶体的制备一般是用电子束曝光和干

法刻蚀相结合而制成. 应用这种方法虽然能够制备大面积的光子晶体, 但是需要经过数道程序才能完成, 从而难免导致光子晶体样品的各种参数出现误差. 聚焦离子束 (FIB) 刻蚀方法是在样品的表面“直接写出”光子晶体, 既能缩短制备光子晶体的时间, 又能够保证光子晶体的质量^[17]. 因此, 在制备小面积的平板光子晶体时, FIB 方法更具有优越性. 图 1 是我们用 FIB 刻蚀方法制作 W3 型光子晶体直波导的扫描电子显微镜照片. 样品的硅膜厚度为 $0.22 \mu\text{m}$, 二氧化硅层的厚度为 $0.375 \mu\text{m}$. 光子晶体是三角晶格结构, 晶格常数和圆孔的半径分别是 0.42 和 $0.12 \mu\text{m}$. 为了提高光的耦合效率, 在光子晶体波导的两端分别做了用于光引入和引出的脊形波导. 入射光沿三角晶格的 Γ - J 方向入射到光子晶体波导, 在通光方向样品的总宽度为 0.3 mm . 由图 1 可以看出, 我们制备的光子晶体无论是在晶格长度的均匀性还是圆孔的均匀性都具有很好的质量. 图 1 中光子晶体两端四个矩形方块为聚焦离子束打掉硅膜后出现的凹槽, 中间为提高光耦合效率的脊形波导.

实验中用可调谐半导体激光器作为光源, 激光器输出激光波长为 $1520\text{--}1640 \text{ nm}$ 连续可调, 由激光器中出来的光经过锥形光纤耦合到样品, 在样品的出射端用同样的光纤接收从样品透射的光并耦合到光功率计. 光功率计的输出用计算机采集. 在样品的上方用一红外相机来监测入射光的传播, 以实现

* 国家重点基础研究发展规划 (批准号: 2001CB610402), 国家纳米科学中心 (批准号: 2003CB716900) 和国家自然科学基金 (批准号: 10404036) 资助的课题.

[†] E-mail: hansz@aphy.iphy.ac.cn

光路的对准.

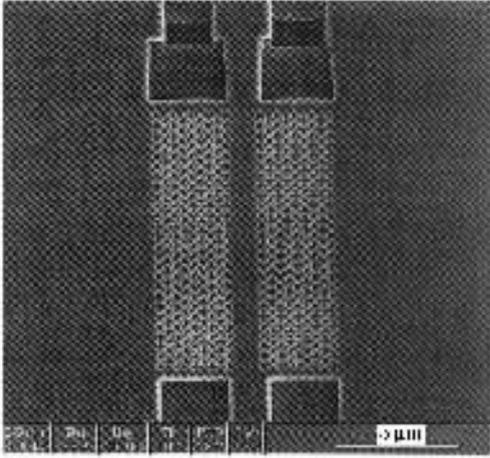


图1 W3型平板光子晶体直波导扫描电子显微镜照片

3. 结果及讨论

我们用 100 倍物镜在样品上方拍摄的光子晶体波导的照片如图 2(a) 中用圆圈标记的部分. 波长为 1550 nm 的激光通过光子晶体的照片如图 2(b). 在图 2 中, 激光的传播方向为从右向左传播. 由于红外光和可见光对样品表面的成像不在一个焦平面上, 从图 2(b) 中不能看到光子晶体和引入、引出波导的图形. 因为样品的表面和脊形波导的侧壁会引起光散射, 所以激光耦合进入光子晶体波导时会沿脊形波导出现一条较暗的散射线, 如图 2(b) 右方所示. 在光子晶体波导与脊形引入波导的接口处, 由于光子晶体的作用光散射很强, 所以散射光变得比较亮, 如图 2(b) 圆圈中表示的部分. 激光在进入光子晶体波导时由于耦合失配而引起的损耗很大, 在通过光子晶体波导后亮线就变得不明显了. 当激光从样品出射后, 由于衍射的作用, 在样品上方能够看到从脊形波导出射端口的很亮红外光斑如图 2(b) 左侧最亮的亮点所示.

我们用红外相机在波导光输出方向上, 即出射端面的一端也拍摄到了激光从引出脊形波导出射的光斑, 如图 3 所示. 从图 3 可以看出, 激光被限制在由硅薄膜制成的脊型波导内. 同时, 我们还能够观察到从样品的上面和衬底中透过的背景光. 为了得到激光通过光子晶体和脊形波导后输出光的强度分布, 我们用锥形光纤测量了波长为 1.55 μm 的激光通过光子晶体样品后在波导中心线且垂直于薄膜表

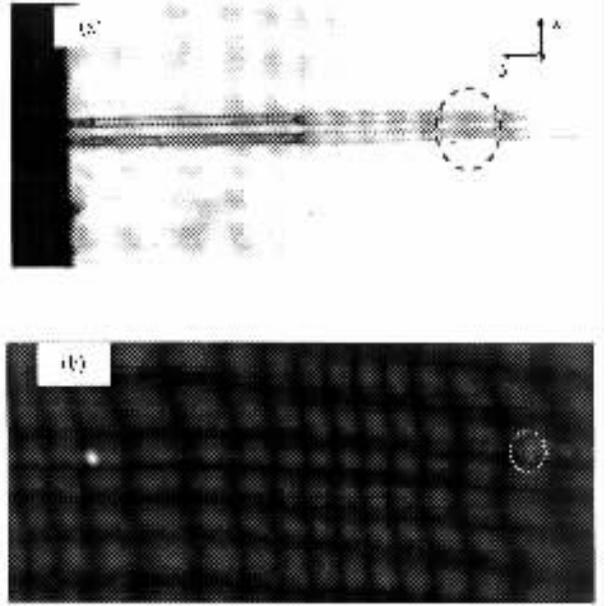


图2 在样品上方拍摄的光子晶体波导照片(a)和在样品上方用红外相机拍摄的近红外光在光子晶体波导中传播的照片(b)

面方向(z 方向)的光强分布, 如图 4(a) 所示. 光强的宽度大于薄膜厚度的原因主要有两个: 一是探测光纤距样品的端面有 2—3 μm 的距离, 探测到的光是衍射后的光斑. 二是我们探测用的锥形光纤本身的直径大约为 1 μm , 比光子晶体薄膜还要厚, 因此光纤所能测到的是在 1 μm 宽度内光强值的平均值. 激光经过引出波导后, 在波导中心线且平行于薄膜表面方向(即图 2(a) 中 x 方向)上的光强分布如图 4(b) 所示. 从图 4 可以看到, 激光经过引出波导在波导的中心位置强度最大, 无论是 x 方向还是沿 z 方向迅速衰减, 说明激光被很好地限制在脊形波导中了. 这与我们在图 3 中能够看到一个很小的亮点一致.



图3 在样品出射端面用红外相机拍摄的出射光斑

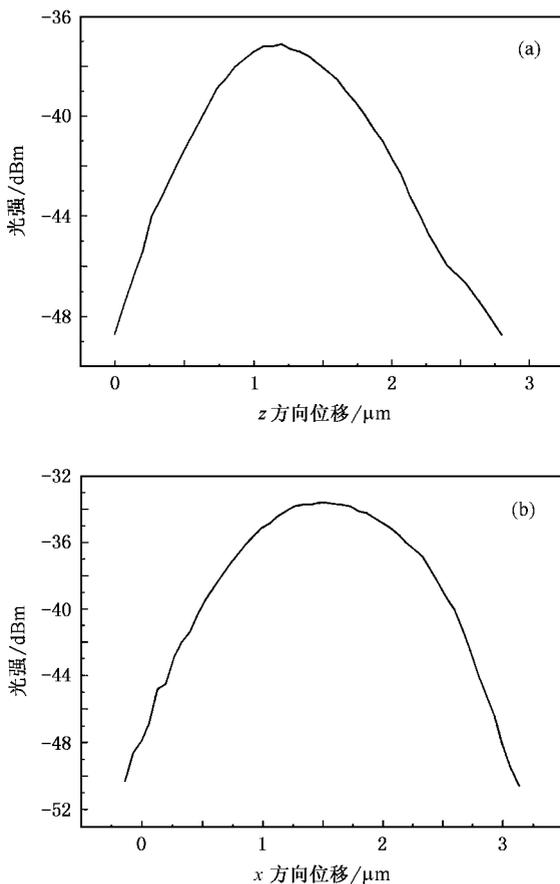


图 4 激光通过 W3 型光子晶体波导后的光强分布 (a)垂直于平板方向 (b)沿薄膜中心线平行于薄膜表面方向

在理论模拟中,我们这种结构的光子晶体的带隙在 1230—1610 nm,而用这种结构的光子晶体制作的 W3 型波导是多模传输的,光子带隙内任意波长的光都能够在光子晶体波导中传播,所以在我们实验测量的波段 1520—1640 nm 光都能够通过.图 5 (a)是我们测量的激光通过 W3 型光子晶体直波导的透过谱,为了与之相对照,我们还同时测量了没有光子晶体时脊形波导的透过谱,如图 5 (b)所示.从图 5 可以看出,无论是脊形波导还是 W3 型光子晶体直波导的透过率都是由短波向长波呈下降的趋势,透过率的最大值和最小值相差 5 dB 左右.这可能是脊形波导本身结构所致.比较图 5 (a)和(b)可

以看出,W3 型光子晶体直波导在所测量的波段是完全透光的.

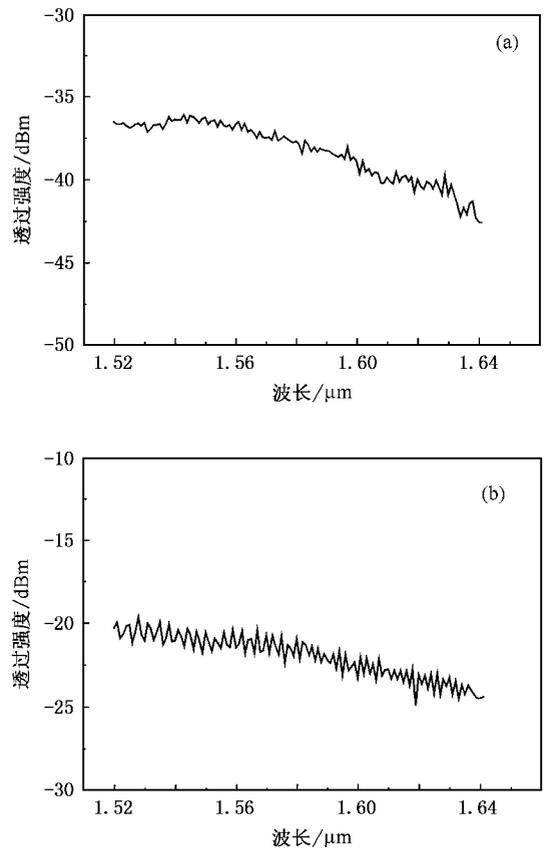


图 5 W3 型平板光子晶体波导透过谱(a)和脊形波导透过谱(b)

4. 总 结

综上所述,我们用 FIB 刻蚀的方法制备了 W3 型平板光子晶体直波导.用红外相机观测了激光在这种波导中传播时的光散射图形,并测量了这种光子晶体直波导的透过谱和耦合到脊型波导后的强度分布.实验表明这种光子晶体在我们测量的通信波段完全透光,并且经过脊形波导能够具有很好的传输特性.这为以后制备和测量光子晶体器件提供了实验基础.

[1] Lau W T, Fan S 2002 *Appl. Phys. Lett.* **81** 3915

[2] Sharkawy A, Pustai D, Shi S *et al* 2003 *Opt. Lett.* **28** 1197

[3] Moll N, Bona G L 2003 *J. Appl. Phys.* **93** 4986

[4] Chutinan A, Okano M, Noda S 2002 *Appl. Phys. Lett.* **80** 1698

[5] Jin C, Sun Z, Cheng B *et al* 2001 *Opt. Commun.* **188** 255

[6] Jin C, Han S, Meng X *et al* 2002 *J. Appl. Phys.* **91** 4771

[7] Feng Z F, Wang Y Q, Xu X S *et al* 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 62 (in Chinese)[冯志芳、王义全、许兴胜等 2004 物理学报 **53** 62]

[8] Qiu M, Jaskorzynska B 2003 *Appl. Phys. Lett.* **83** 1074

[9] Lin S Y, Chow E, Bur J *et al* 2002 *Opt. Lett.* **27** 1400

[10] Inoue K, Sugimoto Y, Ikeda N *et al* 2004 *J. Appl. Phys.* **43** L446

- [11] Takano H , Akahane Y , Asano T *et al* 2004 *Appl. Phys.* **84** 2226
- [12] Borel P I , Frandsen L H , Harpoth A *et al* 2005 *Electron. Lett.* **41** 69
- [13] Xu X S , Wang Y Q , Han S Z *et al* 2004 *Chin. Phys.* **13** 1474
- [14] Wu L , Ye Z , He S L 2003 *Chin. Phys.* **12** 642
- [15] Mulot M , Qiu M , Swillo M *et al* 2003 *Appl. Phys. Lett.* **83** 1095
- [16] Olivier S , Benisty H , Weisbuch C *et al* 2003 *Opt. Express* **11** 1490
- [17] Tian J , Han S Z , Cheng B Y *et al* 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 1218 (in Chinese) [田 洁、韩守振、程丙英等 2005 物理学报 **54** 1218]

Fabrication of straight waveguide in two-dimensional photonic crystal slab and its light propagation characteristics *

Han Shou-Zhen Tian Jie Feng Shuai Ren Cheng Li Zhi-Yuan Cheng Bing-Ying Zhang Dao-Zhong

(*Institute of Physics , Chinese Academy of Sciences , Beijing 100080 , China*)

(Received 19 April 2005 ; revised manuscript received 10 June 2005)

Abstract

Using focused ion beam lithograph , we fabricated W3 straight waveguide in two-dimensional photonic crystal slab on SOI (silicon on insulator) wafer. The light propagation was observed on top and from the end of the sample. The transmission dip and mode distribution at the outlet of ridged waveguide were measured. The results show that light can propagate in the photonic crystal waveguide.

Keywords : photonic crystal waveguide , band-gap , ridged waveguide

PACC : 4265K , 4225B , 4270Q

* Project supported by the State Key Development Program for Basic Research of China (Grant No. 2001CB610402) , the National Center for Nanoscience and Technology , China (Grant No. 2003CB716900) , and the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 10404036) .