

# 带边工作的光子晶体平板的设计与制作\*

唐海侠<sup>†</sup> 王启明

(中国科学院半导体研究所光电子研发中心, 北京 100083)

**摘要:** 光子晶体的带边群速度反常特性可以用于放大一些光学过程, 从而在光电子学领域中具有广泛的应用前景. 文中以 SOI 材料为例, 利用 3D PWE 法对带边工作的光子晶体结构参数进行设计, 采用电子束曝光和 ICP 刻蚀方法结合在 SOI 衬底的顶层 Si 上刻蚀三角晶格的空气孔形成光子晶体结构, 并通过透射特性测量得到了带边的位置, 发现与设计值存在一定的偏差, 主要是实际制作的空气孔尺寸比设计值大的缘故. 通过在同一样品上制作一组晶格常数相同、孔半径不同的光子晶体结构, 得到了带边位置位于 1548nm 波长的光子晶体, 与设计的 1550nm 基本相符.

**关键词:** 光子晶体平板; SOI; 光子带隙; 带边; 群速度

**PACC:** 4270Q

**中图分类号:** TN256

**文献标识码:** A

**文章编号:** 0253-4177(2007)S0-0360-04

## 1 引言

随着微电子芯片集成度的大规模提高, 信息的传递速率已经受到“RC 延迟瓶颈效应”的限制, 于是人们开始专注于光子技术的研究, 希望用光子取代电子作为信息传输的载体, 从而大幅度提高信息的传递速率. 但是传统的光学器件与电子集成器件相比体积大得多, 这使得光学器件的应用难以取得重大的进步. 而光子晶体的出现使人们看到了希望的曙光, 它不仅可以实现器件的小型化, 而且可以实现多种功能器件的单片集成. 光子晶体的基本特性是具有类似于半导体能带的光子带隙(PBG), 在光子带隙范围内的光无法传播. 若在光子晶体中引入缺陷, 就会在 PBG 中引入频率极窄的缺陷态, 位于缺陷频率的光可以在缺陷处传播, 这种特性称为光子局域, 因此利用光子晶体可以控制光子的运动, 这种独特的光控能力给光电集成、光子集成以及光通信技术的发展和带来了生机和活力. 固然, 三维的光子晶体能够实现完全的光子带隙, 光限制的能力也最强, 但是利用目前的半导体加工工艺制作三维的光子晶体难度很大, 于是研究的热点转向二维的光子晶体平板结构(2D PCS), 这种结构更容易在亚微米波长范围内制作, 并且能够实现三维的光限制, 即利用光子带隙效应实现面内的光限制, 利用全内反射效应实现垂直方向的光限制, 因此在光电子

学领域中具有广阔的应用前景.

虽然光子带隙和光子局域两个基本特性是光子晶体广泛应用的物理基础, 但是, 光子晶体的另一基本性质即带边群速度反常特性也是人们广泛关注的焦点. 在光子晶体中, 辐射场本征模的群速度为  $v_g = \frac{\partial \omega}{\partial k}$ , 可通过色散曲线(即光子晶体能带)的斜率给出. 通常, 在光子晶体的某些带边附近, 能带较平坦, 因此具有很小的群速度, 这种现象称为群速度反常. 因为在光子晶体中, 群速度等于能量的传播速度<sup>[1]</sup>, 群速度小就意味着能量传播速度也很小, 从而辐射模式和物质系统之间的相互作用时间很长, 导致它们之间发生高效率耦合, 这有助于放大一些光学过程, 例如可以放大受激发射, 制作低阈值的激光器<sup>[2]</sup>, 放大非线性效应<sup>[3]</sup>, 光延迟器件<sup>[4]</sup>等. 因此研究光子晶体的带边特性是一个具有重要意义的课题.

本文以 SOI 光子晶体平板为例, 采用 3D PWE (three dimensional plane wave expansion) 法对带边工作的光子晶体结构参数进行设计, 然后利用电子束曝光(electron beam lithography)和感应耦合等离子体刻蚀(inductively coupled plasma)方法在 SOI 的顶层 Si 上制作了带边工作的光子晶体结构, 并通过测量透射光谱验证了带边的位置与设计值相符.

\* 国家自然科学基金资助项目(批准号:60336010,60537010)

<sup>†</sup> 通信作者. Email: thx@mail.semi.ac.cn

2006-12-12 收到, 2006-12-28 定稿

## 2 带边工作的光子晶体参数设计

因为对于空气孔光子晶体结构而言,三角晶格比正方晶格具有更大的类 TE 模光子带隙,所以这里我们研究三角晶格的空气孔光子晶体结构.光子晶体的晶格周期和空气孔半径分别用  $a$  和  $r$  表示,光子晶体平板的厚度(SOI 的顶层 Si 厚度)用  $t$  来表示.选取  $r/a = 0.38$ ,  $t/a = 0.5$ ,利用 3DPWE 方法计算出的光子晶体平板的能带结构如图 1 所示.

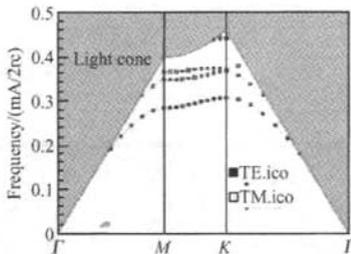


图 1 利用 3DPWE 方法计算得到的光子晶体平板结构的能带结构

Fig.1 Calculated band diagram of photonic crystal slab by 3DPWE method

其中,灰色的阴影区域代表光锥,它的斜率是由氧化物包层( $\text{SiO}_2$  包层)的折射率来决定的,即为  $c/n$ .这里我们取  $\text{SiO}_2$  层的折射率为 1.45.光锥中的模式为辐射模.白色区域为导模存在的范围.其中实心正方形连起来的点表示类 TE 导模,而空心正方形连起来的点表示类 TM 导模.可以看出,在  $\Gamma$ -K 方向上,类 TE 基模的低频带边位于归一化频率  $a/\lambda$  处.如果给定有源材料的发光峰值波长为 1550nm,要使光子晶体精确地工作在低频带边位置,即  $a/\lambda = 0.31$ ,那么应设计光子晶体的晶格常数为 480nm,空气孔的半径为 182nm,光子晶体平板的厚度为 240nm.

## 3 带边工作的光子晶体的制作与表征

我们采用的 SOI 衬底材料顶层 Si 的厚度约为 340nm,埋层  $\text{SiO}_2$  的厚度为  $1\mu\text{m}$ .首先采用热氧化的方法减薄 Si 层至约 240nm.然后利用电子束曝光和感应耦合等离子体刻蚀方法在 SOI 的顶层 Si 上刻蚀空气孔形成三角晶格空气孔光子晶体结构,如图 2 所示.为了便于测试该光子晶体平板的带边位置,我们制作了宽的脊形波导,在脊形波导的中央作上光子晶体,这样就可以方便地利用脊形波导来输入输出光信号.其中光子晶体区域的宽度覆盖整个

脊形波导的宽度,即为  $10\mu\text{m}$ ,长度为 25 排空气孔周期,取向为  $\Gamma$ -K 方向.空气孔的周期为 480nm,空气孔半径与周期之比为 0.38,如图 3 所示.

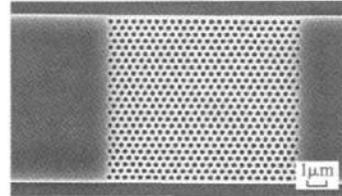


图 2 制作的光子晶体样品 SEM 图像

Fig.2 SEM image of the fabricated photonic crystal sample

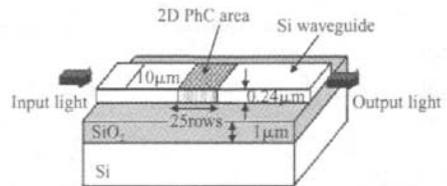
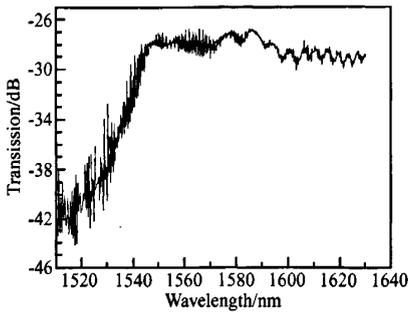


图 3 用作透射测量的样品结构示意图

Fig.3 Schematic view of the sample used in transmission measurement

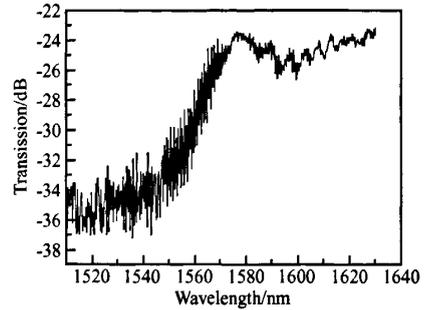
为了得到光子晶体的带边信息,我们利用自动对准耦合系统和 Agilent DWDM 测试系统对样品进行了透射测量.其中,采用的可调谐激光器的扫描波长范围是 1510 ~ 1630nm,最大输出功率为 3mW.首先将样品解理露出输入输出波导,将激光器的光用一个金属化的拉锥光纤耦合到样品的输入波导中,输出光用一个普通的拉锥光纤连接到 Agilent 系统来测试透射谱.输入端利用金属化光纤的目的在于使光纤重量增加,以防止测试过程中光纤抖动影响测试结果.因为输入脊形波导的端面很薄,仅为 240nm,光纤与波导之间的耦合损耗较大,因此输入输出光纤与脊形波导的对准是十分重要的,于是将样品放在一个六维可调的台子上,通过计算机可以精确控制台子的移动,而且系统中装有两个红外 CCD 系统,可以分别从样品的上面和侧面看到光纤与样品之间的相对位置,方便调节光纤与输入输出波导的耦合.通过扫描激光器的整个波长范围,就可以观察到通过样品的透射谱. Agilent 系统直接探测到的是输出的光功率,但是系统会自动将其转化为损耗输出.因此实际得到的数据是输入光通过样品之后的透射损耗.图 4 给出了我们的测试结果.可以看出在波长为 1540nm 左右处,损耗发生突变,在波长小于 1540nm 时,损耗最大,达到

图 4 测量得到的透射谱( $r = 184\text{nm}$ )Fig. 4 Measured transmission spectrum ( $r = 184\text{nm}$ )

43dB,而当波长大于 1540nm,损耗变为 27dB,即消光比为 16dB,这说明了 1540nm 波长是该光子晶体带隙的长波长带边.这与前面的理论模拟结果稍有偏差,可能原因有两个:首先,3DPWE 方法是将样品在垂直方向上看作超元胞的周期性重复,所以本身就是一种近似.这是由计算方法本身的性质决定的,因而是一种固有的偏差.再者,由于在光子晶体的带边设计中,由图 1 我们得到在  $\Gamma$ -K 方向上,类 TE 基模的低频带边位于归一化频率处.实际上,更精确的归一化频率应处在  $a/\lambda = 0.3078$ ,那么对于 1550nm 波长,应设计光子晶体的晶格常数为 477nm,而我们制作时取晶格常数为 480nm,这无疑会使带边波长向长波方向移动,但是,我们实际上测出的带边相对设计值而言,却向短波方向移动,因此这个因素不是影响带边移动的主要因素.另外,实际制作的空气孔与设计值不可避免会产生一定程度的差异,这也会导致带边波长的偏离.为了进一步确认制作过程产生的尺寸偏差的影响,我们通过 SEM 测试了该光子晶体结构中空气孔的半径为 184nm,在这一实测值下,计算得到  $\Gamma$ -K 方向类 TE 模的低频带边位于  $a/\lambda = 0.3108$ ,对应的波长范围为 1544nm,因此基本与测量值相符.可见,测量的带边与模拟结果的偏差主要是由于制作过程中引入的空气孔的尺寸与设计值的偏差导致.

虽然,我们可以通过调节工艺参数来减小制作过程中引入的空气孔尺寸的偏差.但是不可能完全消除,所以想在确定厚度的平板上仅仅制作一个光子晶体结构就使带边准确地处在设计位置是很困难的,但是我们可以制作在同一组光子晶体结构,保持晶格常数  $a$  不变,在设计值附近取一组  $r$  值,就能找到其中一个光子晶体的带边位置与设计值吻合.在我们制作的一组光子晶体结构中, $r$  从 175nm 变化到 185nm,间隔为 1nm,经 SEM 测试发现当  $r = 183.4\text{nm}$  时,测量得到的带边波长位置处在 1548nm 处,如图 5 所示.因此与设计的

1550nm 基本相符.

图 5 测量得到的透射谱( $r = 183.4\text{nm}$ )Fig. 5 Measured transmission spectrum ( $r = 183.4\text{nm}$ )

如果有源材料的发光波长位于 1550nm 处时,它准确地位于光子晶体平板带边的位置,因此受激发射将会被显著放大.由上面的计算可见,当  $r$  从 183.4nm 增加到 184nm 时,带边波长从 1548nm 移动到 1544nm,也就是说空气孔的半径仅变化 0.6nm,带边的波长就会移动 4nm,因此空气孔半径的精确控制尤为重要,这无疑增加了制作的难度,也是带边工作的光子晶体器件难于实现的主要原因之一.

另外需要指出的是,上面得到的透射损耗不仅包含通过 2D 光子晶体的透射损耗,还包括脊形波导的传输损耗、脊形波导与输入输出光纤的耦合损耗,脊形波导与光子晶体界面处的散射损耗等.为了得到 2D 光子晶体固有的透射,可以在同一个样品上制作中间没有 2D 光子晶体的脊形波导结构.对含有光子晶体的和没有光子晶体的结构同时进行透射测试,将得到的透射损耗相减,就会消除上面提到的其他几种损耗的影响,从而得到 2D 光子晶体的绝对透射损耗.但是由于我们的目的是确定光子晶体的带边位置,所以不需要如此繁琐.

## 4 结论

本文以 SOI 材料为例,首先利用 3DPWE 法对带边工作的光子晶体结构参数进行设计,当有源材料的发光峰值波长位于 1550nm 时,光子晶体的晶格常数、空气孔半径和平板的厚度应分别选为 480, 182 和 240nm.然后采用电子束曝光和 ICP 刻蚀方法在 SOI 衬底的顶层 Si 上刻蚀三角晶格的空气孔形成光子晶体结构.最后通过透射特性测量得到了带边的位置,发现与设计值存在一定的偏差,主要是实际制作的空气孔尺寸比设计值大的缘故,从而造成带边波长向短波方向移动.通过在同一组样品上制

作一组晶格常数相同、孔半径不同(在设计值附近取值)的光子晶体结构,得到了带边波长为 1548nm 的光子晶体,与设计 的 1550nm 基本相符。

#### 参考文献

- [1] Sakoda K. Optical properties of photonic crystals. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2001
- [2] Sugitatsu A, Noda S. Room temperature operation of 2D photonic crystal slab defect-waveguide laser with optical pump. *Electron Lett*, 2003, 39(2), 213
- [3] Soljacic M, Joannopoulos J D. Enhancement of nonlinear effects using photonic crystals. *Nature Materials*, 2004, 3, 211
- [4] Mori D, Baba T. Dispersion-controlled optical group delay device by chirped photonic crystal waveguides. *Appl Phys Lett*, 2004, 85(7), 1101

## Design and Fabrication of Photonic Crystal Slab Operating at Band Edge\*

Tang Haixia<sup>†</sup> and Wang Qiming

(State Key Joint Laboratory of Integrated Optoelectronics, Institute of Semiconductors,  
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China)

**Abstract:** The anomalous group velocity at band edge of photonic crystal can be used to enhance some optical process, which has applications in optoelectronics field. In this paper, SOI material was taken for example, the structure parameters of photonic crystal operating at band edge were designed by 3D PWE method and the triangular lattice air-hole silicon photonic crystal was fabricated by the combination of EBL and ICP etching. The position of band edge was obtained by the measurement of transmission characteristics, there is a difference between the measured band edge and designed band edge, which is mainly due to the larger size of air holes than the designed value. The photonic crystal whose band edge lying at 1548nm was obtained by fabricating a series of photonic crystal structures with the same lattice constant and different air hole radius, this wavelength is basically in accord with the designed 1550nm.

**Key words:** photonic crystal slab; SOI; photonic bandgap; band edge; group velocity

**PACC:** 4270Q

**Article ID:** 0253-4177(2007)S0-0360-04

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Nos. 60336010, 60537010)

<sup>†</sup> Corresponding author. Email: thx@mail.semi.ac.cn

Received 12 December 2006, revised manuscript received 28 December 2006