

正方形空气孔 L3 型光子晶体平板微腔的研究与设计

韩利红 刘立明 郭璇 俞重远 林本龙 赵慧杰 刘习 刘玉敏 芦鹏飞

(北京邮电大学信息光子学与光通信国家重点实验室, 北京 100876)

摘要 从矩形空气孔光子晶体平板的研究入手,设计了一种新型的正方形空气孔 L3 型光子晶体平板微腔。采用有限时域差分法,计算了正方形空气孔 L3 型光子晶体微腔的 Q 值、模体积及谐振频率;讨论了正方形空气孔边长对微腔 Q 值、模体积及谐振频率的影响。对 L3 型光子晶体平板微腔进行了优化,设计出了 Q 值为 27719、模体积为 $0.4361(\lambda/n)^3$ 、谐振波长为 1543 nm 的正方形空气孔的 L3 型光子晶体平板微腔。该 L3 型光子晶体平板微腔的 Purcell 因子高达 4767。

关键词 材料;光电子学;光子晶体微腔;Q 值;模体积;Purcell 因子

中图分类号 O441.4 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.1116005

Research and Design of L3 Square Air Holes Photonic Crystal Cavity

Han Lihong Liu Liming Guo Xuan Yu Zhongyuan Lin Benlong Zhao Huijie

Liu Xi Liu Yumin Lu Pengfei

(State Key Laboratory of Information Photonics and Optical Communications, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

Abstract According to the research of rectangular photonic crystal slab, an L3 square air holes photonic crystal cavity is proposed. The Q factors, mode volumes, and resonant frequencies of L3 square air holes photonic crystal cavities with different side lengths are discussed using finite difference time domain (FDTD) method. Based on the results, an L3 square air holes photonic crystal cavity is proposed and a fairly high Q value of 27719 is obtained, with the mode volume of $0.4361(\lambda/n)^3$ and the resonant wavelength at 1543 nm. The Purcell factor of the L3 square air holes photonic crystal cavity is as high as 4767.

Key words materials; optoelectronics; photonic crystal cavity; Q factor; mode volume; Purcell factor

OCIS codes 160.5298; 140.3948; 230.5298

1 引言

随着光通信高速发展,目前依赖光/电、电/光转换的通信网在带宽和传输速率上的不足已经凸显出来。为了解决这些不足提出了宽带宽、高传输速率的全光网络,而全光网络的实现必须依靠新型的光电子器件,例如激光器、滤波器、复用/解复用器等^[1-2]。这些光电子器件中大部分需要依靠高性能的光学微腔。光学微腔是指至少在一个方向上腔尺寸与谐振光波长可比拟的光学微型谐振腔。高品质因数 Q,小模体积 V_m 的光学微腔为调制光与物质之间的相互作用提供了有力手段。

光子晶体自从被提出以来就因其优良的控制光的能力而被广泛应用于光通信领域^[3-5],由于其光子带隙等特性,光子晶体备受研究人员的关注^[6-7]。由二维光子晶体制作的光子晶体平板相对较易制作且可以较好地束缚光,从而使得基于光子晶体平板设计的光子晶体微腔更易达到高品质因数、小模体积的性能要求。

L3 型光子晶体微腔指的是中间一排的三个空气孔被去除的光子晶体平板微腔。利用 L3 型光子晶体微腔可以演示腔量子电动力学的一些基本现象,也可以制作超低阈值激光器^[8-9]。通常的 L3 型

收稿日期: 2013-05-26; 收到修改稿日期: 2013-06-14

基金项目: 国家 863 计划(2013AA031501)、中央高校基本科研业务费专项资金(2012RC0402)

作者简介: 韩利红(1974—),女,博士,副教授,主要从事人工微结构材料方面的研究。E-mail: hanlh_star@gmail.com

光子晶体微腔是三角晶格、圆形空气孔的光子晶体微腔,这种光子晶体微腔虽然得到了一个较高的 Q 值,但是模体积 V_m 相对较大,因此圆形空气孔 L3 型光子晶体微腔的 Purcell 因子只有 1000 左右。为了得到更高的 Purcell 因子,本文选择用矩形空气孔代替圆形空气孔,这是因为矩形空气孔的对称性较低,几何结构的可调性更好。

早在 2004 年, Baek 等^[10]就已经有了关于矩形空气孔平板二维光子晶体微腔的研究,根据文章中所述,控制矩形空气孔的刻蚀深度是可以控制微腔的谐振频率的。目前 L3 型光子晶体微腔正是通过自上而下的光刻技术来实现,因此基于矩形空气孔二维光子晶体平板设计的光子晶体微腔可以很好地实现谐振频率的控制。Baek 等对矩形空气孔平板二维光子晶体微腔的研究局限在对谐振频率的控制,没有涉及微腔的 Q 值及模体积。本文基于平面波展开法研究光子晶体平板的能带结构,采用有限时域差分(FDTD)法计算光子晶体微腔的 Q 值与模体积 V_m ,从矩形空气孔光子晶体平板的研究入手,使用美国麻省理工学院(MIT)的科学家开发的开源软件 MEEP 进行理论计算,验证了正方形空气孔光子晶体平板有着更优越的性能。在此基础上设计了正方形空气孔 L3 型光子晶体微腔,得到了更小的模体积,从而提高了 Purcell 因子。

2 矩形空气孔二维光子晶体平板的研究

从矩形空气孔二维光子晶体平板研究入手,根据得到的结论对微腔的 Q 值与模体积进行研究与优化。图 1 为三角晶格矩形空气孔光子晶体平板研究模型,其中 a 为晶格常数。

为了设计出性能最优的平板二维光子晶体微

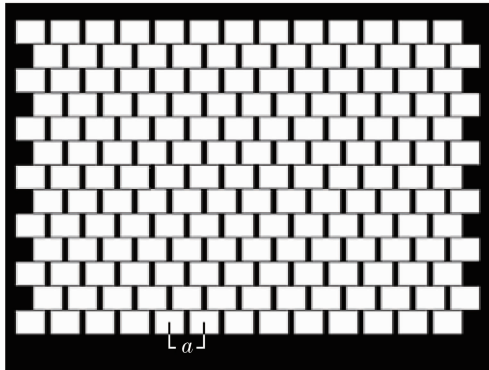


图 1 三角晶格矩形空气孔光子晶体平板研究模型
Fig. 1 Model of triangle lattice rectangle air holes photonic crystal slab

腔,首先研究矩形空气孔的长宽比对矩形空气孔二维光子晶体平板的 Q 值及谐振频率 f 的影响。矩形面积保持不变,不同长宽比之下的平板二维光子晶体微腔 Q 值及谐振频率 f 的变化情况如图 2 所示(图中 f 为归一化的谐振频率,单位为 c/a , c 为真空中光速, a 为光子晶体的晶格常数,以下图中的 f 相同)。由图 2 可以看出,随着长宽比的增加, Q 值及谐振频率 f 均不断减小。这是由于矩形空气孔面积保持不变时,随着长宽比的增大,矩形空气孔越来越细长,导致光场越来越难束缚在二维光子晶体平板中,造成了 Q 值的不断下降;同时,当改变长宽比时,光子晶体的能带结构会发生变化(如图 3 所示),而能带结构的变化对谐振频率产生了影响,导致谐振频率不断减小。

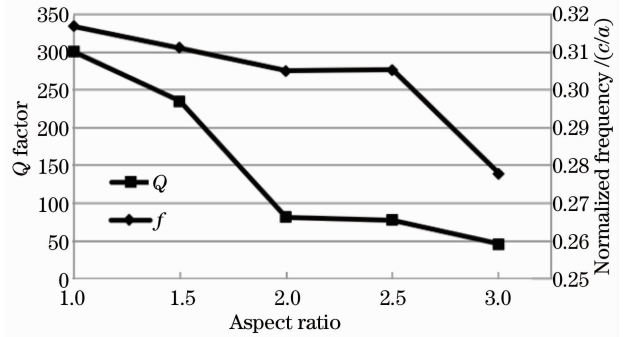


图 2 矩形空气孔光子晶体平板 Q 值及谐振频率 f 随空气孔长宽比的变化

Fig. 2 Q factor and resonant frequency f as functions of aspect ratio

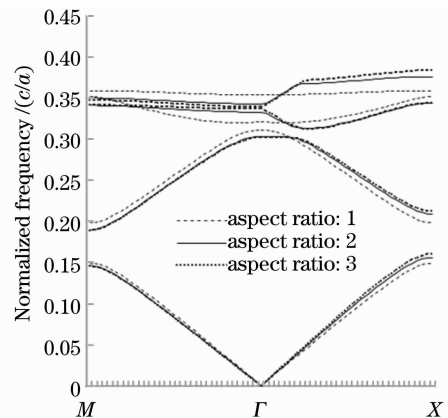


图 3 矩形空气孔光子晶体平板能带结构随矩形空气孔长宽比的变化

Fig. 3 Band structures of rectangle air holes photonic crystal with different aspect ratios

由上述分析可知,当矩形空气孔的长宽比为 1:1 时,即当空气孔为正方形时,光子晶体平板具有最高的 Q 值,因此将选择正方形空气孔的二维光子晶体

平板作为设计光子晶体微腔的基础。

3 L3 型正方形空气孔光子晶体微腔的研究与设计

基于上述正方形光子晶体平板,设计了 L3 型正方形空气孔光子晶体微腔,如图 4 所示。其中平板厚度 h 为 $0.35a$,晶格常数 $a=750\text{ nm}$,介质材料为硅。首先研究了正方形空气孔边长对微腔的 Q 值、模式体积 V_m 及谐振频率 f 的影响,然后对微腔进行了优化。

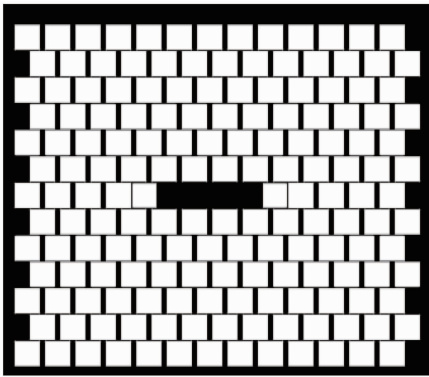


图 4 L3 型正方形空气孔光子晶体微腔

Fig. 4 L3 square air holes photonic crystal cavity

图 5 为当正方形空气孔边长从 $0.55a$ 增加到 $0.8a$ 时 Q 值及谐振频率 f 的变化。可以看出,随着边长的增大, Q 值和谐振频率 f 也不断增加。这是因为随着边长的增大,空气孔面积不断增加,光场的局域性增强,因而 Q 值不断增大。谐振频率的增加则是由于能带结构随着空气孔边长的增加向上移动造成,如图 6 所示。这与圆形空气孔光子晶体微腔所得到的结果是一致的^[11]。

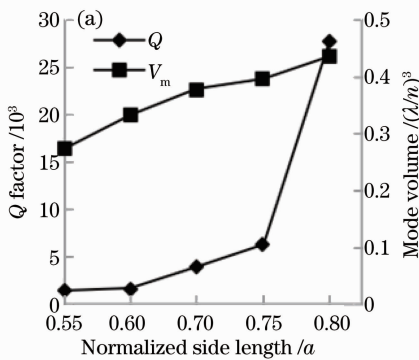


图 7 (a) Q 值、模式体积随空气孔边长的变化; (b) Purcell 因子随空气孔边长的变化

Fig. 7 (a) Q factor and mode volume as functions of air holes' side length; (b) Purcell factor as a function of air holes' side length

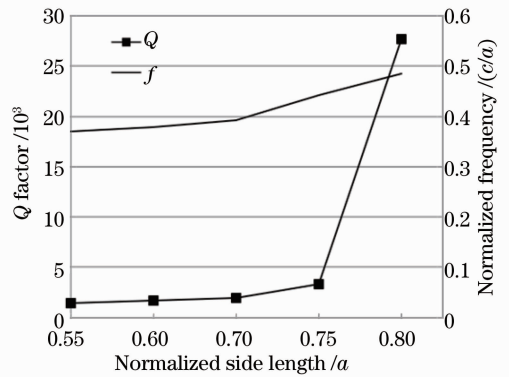


图 5 微腔 Q 值及谐振频率 f 随正方形空气孔边长的变化

Fig. 5 Q factor and resonate frequency f as functions of square air holes' side length

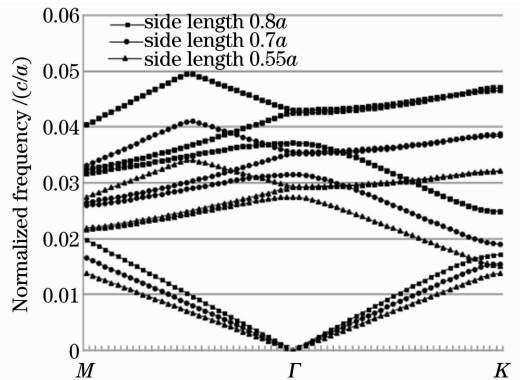
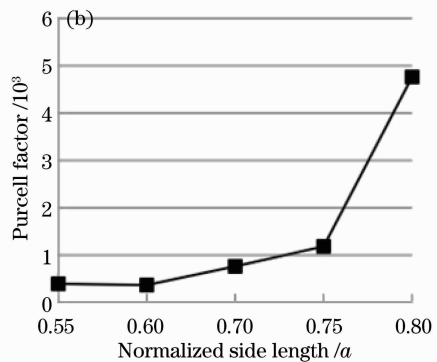


图 6 正方形空气孔边长增加时微腔能带结构的变化

Fig. 6 Band structures of cavity with different square air holes' side lengths

正方形空气孔边长从 $0.55a$ 增加到 $0.8a$ 时,模式体积 V_m 和 Q 值随边长的变化如图 7(a)所示,根据图 7(a)中的 Q 值与 V_m 的值可以求出 Purcell 因子,如图 7(b)所示。Purcell 因子定义为 $F_p = \frac{3}{4\pi^2} \times$



$\frac{Q}{V_m} \left(\frac{\lambda}{n} \right)^3$, 其中 λ 为波长, n 为介质折射率。Purcell 因子是表征光学微腔性能的重要参数, 高 Purcell 因子意味着高自发辐射率。由图 7(a) 可看到, 随着边长的增大, Q 值和模式体积 V_m 都在不断增加, 但 Q 值的增长速度比模式体积的增长速度要快很多, 因此在图 7(b) 中可以清楚显示 Purcell 因子随正方形空气孔边长增加而迅速增加。

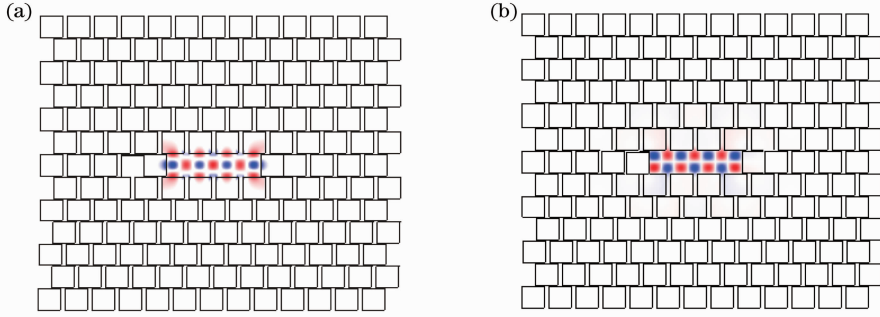


图 8 空气孔边长为 $0.8a$ 时微腔中的场分布。(a) E_x ; (b) H_z

Fig. 8 Field distributions in cavity with a side length of $0.8a$. (a) E_x ; (b) H_z

4 结 论

从矩形空气孔二维光子晶体平板入手, 得到了 Q 值较高的正方形空气孔光子晶体平板, 在此基础上设计出了 L3 型正方形空气孔光子晶体平板微腔。设计出了 Q 值为 27719、模体积为 $0.4361(\lambda/n)^3$ 、谐振波长为 1543 nm 的正方形空气孔 L3 型光子晶体平板微腔。设计所得光子晶体微腔具有较高的 Q 值和较小的模体积, 谐振波长在 1550 nm 通信窗口附近, Purcell 因子高达 4767。这样的光子晶体微腔可以用于制作多种光通信领域所用到的光器件, 如低阈值激光器、窄带滤波器和波长复用/解复用器等, 这种微腔也可以用于产生单光子源装置, 来提高单光子源的效率, 设计出的光子晶体微腔在制作传感器方面也有很大的应用前景。

参 考 文 献

- 1 Cui Desheng, Guo Weiling, Cui Bifeng, *et al.*. Preparation and temperature-variation properties of high color rendering index LED [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(1): 0123005.
- 2 Sun Xiangyang, Zhang Guoyu, Duan Jie, *et al.*. Design of star charts simulator for high-precision star simulator [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(5): 0523001.
- 3 E Yablonovitch. Inhibited spontaneous emission in solid-state

由以上分析可知, 当正方形空气孔边长为 $0.8a$ 时, L3 型光子晶体平板微腔具有最好的性能, 此时的 Q 值为 27719, 模体积为 $0.4361(\lambda/n)^3$, 谐振波长为 1543 nm, Purcell 因子达到 4767, 是圆形空气孔 L3 型光子晶体平板微腔的 4 倍^[8]。此时微腔的场分布如图 8 所示, 从图中可以看出, 光被很好地束缚在微腔中。

- physics and electronics [J]. *Phys Rev Lett*, 1987, 58(20): 2059–2062.
- 4 S John. Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices [J]. *Phys Rev Lett*, 1987, 58(23): 2486–2489.
- 5 Wang Rong, Liang Binming, Zhang Lichao, *et al.*. Tunable optical power splitter based on the point defects of two-dimensional photonic crystal [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(1): 0123001.
- 6 Liu Jinchuan, Jiang Wei, Li Shuping, *et al.*. Study of photonic band gap of 2D photonic crystals used in short-wavelength LED [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(6): 0623006.
- 7 Han Lihong, Liu Liming, Yu Zhongyuan, *et al.*. Effects of filling ratio and lattice points direction on two-dimensional triangular-lattice photonic crystal band gap characteristics [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(1): 0116003.
- 8 Yoshihiro Akahane, Takashi Asano, Bong-Shik Song, *et al.*. High-Q photonic nanocavity in a two-dimensional photonic crystal [J]. *Nature*, 2003, 425(6961): 944–947.
- 9 S P Anderson, P M Fauchet. Ultra-low power modulators using MOS depletion in a high-Q SiO₂-clad silicon 2-D photonic crystal resonator [J]. *Opt Express*, 2010, 18(18): 19129–19140.
- 10 Jong-Hwa Baek, Dae-Sung Song, In-Kag Hwang, *et al.*. Transverse mode control by etch-depth tuning in 1120-nm GaInAs/GaAs photonic crystal vertical-cavity surface-emitting lasers [J]. *Opt Express*, 2004, 12(5): 859–867.
- 11 P Nedel, X Letartre, C Seassal, *et al.*. Design and investigation of surface addressable photonic crystal cavity confined band edge modes for quantum photonic devices [J]. *Opt Express*, 2011, 19(6): 5014–5025.