

# 高品质二维三角晶格光子晶体 90°弧度弯曲波导

唐发林<sup>1,2</sup> 刘桂强<sup>1,2</sup> 黎磊<sup>1,2</sup> 龚丽霞<sup>1,2</sup> 陈元浩<sup>1,2</sup> 黄宽<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup>江西师范大学物理与通信电子学院, 江西 南昌 330022)  
(<sup>2</sup>江西省光电子与通信重点实验室, 江西 南昌 330022)

**摘要** 设计了基于二维三角晶格光子晶体的 90°弧线弯曲波导以实现  $\Gamma$ -K 波导和  $\Gamma$ -M 波导的连接。通过在弯曲弧线和  $\Gamma$ -M 波导两侧引入缺陷面, 形成了具有布拉格反射和全内反射的双重光子局域作用。模拟可得该二维三角晶格光子晶体 90°弧线弯曲波导的透射率达 90%。

**关键词** 光子晶体; 光子带隙; 弧线弯曲; 缺陷面; 透射率

**中图分类号** O472<sup>+</sup>.3 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP49.121301

## High Quality 90°-Arc-Bend Waveguide Based on Two-Dimensional Triangular Lattice Photonic Crystal

Tang Falin<sup>1,2</sup> Liu Guiqiang<sup>1,2</sup> Li Lei<sup>1,2</sup> Gong Lixia<sup>1,2</sup>

Chen Yuanhao<sup>1,2</sup> Huang Kuan<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup>*Institute of Physics and Communication Engineering, Jiangxi Normal University, Nanchang, Jiangxi 330022, China*  
<sup>2</sup>*Jiangxi Provincial Key Laboratory of Optoelectronic and Communication, Nanchang, Jiangxi 330022, China*)

**Abstract** The 90°-arc-bend waveguide which connects the  $\Gamma$ -K and  $\Gamma$ -M waveguides is designed based on two-dimensional triangular lattice photonic crystals. The double-photon localization of Bragg reflection and total internal reflection is achieved by the introduction of defect surfaces on the arc and both sides of the  $\Gamma$ -M waveguide. Thus, the 90°-arc-bend waveguide based on two-dimensional triangle lattice photonic crystal with transmittance of 90% was realized in simulation.

**Key words** photonic crystals; photonic band gaps; arc bend; defect surface; transmittance

**OCIS codes** 130.5296; 160.5298; 230.5298; 230.3120; 250.5300

## 1 引言

光子晶体这一概念源于 1987 年 Yablonovitch<sup>[1]</sup> 利用光子晶体完全禁带抑制其中介质的自发辐射和 John<sup>[2]</sup> 通过在存在禁带的光子晶体中引入随机介电常数变化实现光场强空间局域的思想<sup>[3]</sup>, 是指由介电常数不同的介质材料在空间呈周期排列而成的人工微结构。由于光子晶体具有光子禁带<sup>[4~6]</sup> 和光子局域等属性, 因而可以制作光子晶体波导、谐振腔、光开关和光子晶体微波天线等高性能光学器件, 在光子集成光路方面有着巨大的应用潜力<sup>[7~12]</sup>。

光子晶体波导是构成光子集成光路的基本器件, 与之相关的研究对于集成光路的发展具有重要意义。然而目前对于基于二维三角晶格光子晶体的 90°弯曲波导的研究相对较少<sup>[13,14]</sup>。要得到性能较好的二维三

**收稿日期**: 2012-06-28; **收到修改稿日期**: 2012-08-03; **网络出版日期**: 2012-10-18

**基金项目**: 国家自然科学基金(11004088)、江西省自然科学基金(2010GQW0025)、江西省科技支撑项目(20112BBE50033)和江西省教育厅科技项目(GJJ10099)资助课题。

**作者简介**: 唐发林(1984—), 男, 硕士研究生, 主要从事光子晶体方面的研究。E-mail: tangkaiilin@163.com

**导师简介**: 刘桂强(1977—), 女, 博士, 副教授, 主要从事光电技术及光子晶体等方面的研究。

E-mail: liougq@yahoo.com.cn(通信联系人)

角晶格光子晶体  $90^\circ$  弯曲波导, 关键是实现波导转角的低损耗和  $\Gamma$ -M 波导的高透射率, 同时扩展  $\Gamma$ -M 波导模的带宽。Zhou 等<sup>[15]</sup> 通过改变  $\Gamma$ -M 波导两侧介质柱半径, 模拟达到了 75% 的通过率, 并通过实验达到了 45% 的通过率。

本文在二维三角晶格(Si-空气柱)光子晶体上设计了一种  $90^\circ$  弧线弯曲波导以连接  $\Gamma$ -K 和  $\Gamma$ -M 方向波导, 并在弯曲弧线和  $\Gamma$ -M 方向波导两侧引入缺陷面, 形成具有布拉格反射和全内反射双重光子局域作用。

## 2 二维三角晶格光子晶体 $90^\circ$ 弯曲波导结构

制作高品质的二维三角晶格光子晶体  $90^\circ$  弯曲波导, 关键是实现波导转角的低损耗和提高  $\Gamma$ -M 直线波导的透射率及带宽。为实现波导转角的低损耗, Zhang 等<sup>[16]</sup> 把转角设计成弧线形波导, 极大地提高了转角的透射率。他们在正方晶格光子晶体模拟中实现了透射率高达的 98.5% 弯曲波导, 并在任意改变弯曲角度的情况下同样具有很好的效果, 这说明弧线形波导在解决波导转角损耗方面具有很大的优势。由于  $\Gamma$ -M 直线波导的边缘结构与  $\Gamma$ -K 波导不同, 致使  $\Gamma$ -M 波导的光子局域能力比  $\Gamma$ -K 波导差, 并且缺陷模式带宽也较窄<sup>[15]</sup>, 所以  $\Gamma$ -M 直线波导也是实现高品质的二维三角晶格光子晶体  $90^\circ$  弯曲波导的关键因素。

二维三角晶格光子晶体是在相对介电常数为 11.56 的硅基片中由周期  $A=375$  nm、半径  $R=110$  nm 的空气柱组成。图 1 为结构图, (a) 为初始结构,  $\Gamma$ -K 波导通过移除一行空气柱而形成的,  $\Gamma$ -M 波导则移除了三列相邻的空气柱而形成的; (b) 为对比结构; (c) 为优化结构, 转角部分设计为弧线形波导, 同时在  $\Gamma$ -M 波导和弯曲波导两侧设计了空气缺陷面(因为是截面图, 所以看到的是线形), 为使弧线比较平滑并能与直线波导良好衔接, 在不改变原有的周期结构的前提下波导弯曲部分的三个空气柱的位置作小幅度移动(如图 1 所示)。

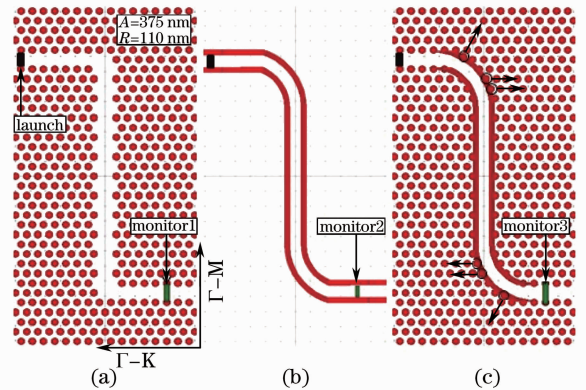


图 1 基于二维三角晶格光子晶体的  $90^\circ$  弯曲波导。

(a) 初始结构; (b) 对比结构; (c) 优化结构

Fig. 1  $90^\circ$  bend waveguide based on two-dimensional triangle lattice photonic crystals. (a) Initial structure; (b) compared structure; (c) optimized structure

## 3 能带分析

光子晶体的理论研究可归结为电磁波在光子晶体中的传播问题。光在介质中传播时其运动规律满足麦克斯韦方程组

$$\begin{cases} \nabla \times \mathbf{H}(\mathbf{r}, t) - \frac{\partial \mathbf{D}(\mathbf{r}, t)}{\partial t} = \mathbf{J}(\mathbf{r}, t) \\ \nabla \times \mathbf{E}(\mathbf{r}, t) + \frac{\partial \mathbf{B}(\mathbf{r}, t)}{\partial t} = 0 \\ \nabla \cdot \mathbf{B}(\mathbf{r}, t) = 0 \\ \nabla \cdot \mathbf{D}(\mathbf{r}, t) = \rho(\mathbf{r}, t) \end{cases}$$

根据光子晶体已知的介电常数  $\epsilon(\mathbf{r})$  分布求解麦克斯韦方程组, 即可得到光子晶体的能带结构。而平面波扩展法(PWE)和时域有限差分法(FDTD)是目前最主要的两种计算光子晶体方法。平面波扩展法是将电磁波以平面波形式展开, 与薛定谔方程一样, 将麦克斯韦方程组化为一个本征方程, 通过求解本征值即可得到光子能带, 常用于计算光子晶体的光子能带结构问题。时域有限差分法是用对空间和时间之差分来替代微分, 将光子晶体单元网格化, 对网格的每个格点列出有限差分形式, 并引入吸收边界条件, 将麦克斯韦方程转化成迭代形式方程求解, 常用于计算光子晶体透射谱问题<sup>[17]</sup>。

### 3.1 光子禁带

由于光子晶体具有光子禁带, 该频率区域的电磁波一旦偏离缺陷处, 就进入频率禁带而禁止传播。这种属性可以有效地减少传播信号的损耗, 使得光子晶体在制作光学器件方面具有广阔的应用前景。

图2为Si平板上由周期 $A = 375$  nm半径 $R = 110$  nm的空气柱组成的二维三角晶格光子晶体的光子能带结构图,可以看到光子晶体具有两个TM波的光子禁带,所以这个结构所讨论的波皆为TM波。光子禁带的归一化频率范围分别为 $0.210 \sim 0.272$ 和 $0.590 \sim 0.618$ ,所对应的波长分别为 $1378 \sim 1785$  nm和 $606 \sim 635$  nm,其中前者是目前的常用通信窗口波长范围,所以本文只对归一化频率为 $0.210 \sim 0.272$ 的光子禁带进行研究。

### 3.2 $\Gamma$ -K波导和 $\Gamma$ -M波导色散关系

在平板二维光子晶体结构中引入线缺陷,如果缺陷导模频率刚好位于光子禁带中,则其在平面内会受光子禁带约束,同时在垂直方向受到折射率差引起的全内反射约束<sup>[18]</sup>,从而被三维约束在线缺陷中实现几乎无损耗传播。

图3为 $\Gamma$ -K波导的色散关系图, $K_x$ 为波矢沿 $\Gamma$ -K方向的分量,从图中可以看到只有归一化频率为 $0.216 \sim 0.272$ 之间的禁带中存在TM导模,对应的波长为 $1378 \sim 1736$  nm,即只有这个频率范围内的TM波可以在 $\Gamma$ -K波导中传播;对于归一化频率为 $0.210 \sim 0.216$ 范围内的TM波则仅局域在光子晶体和波导中,但无法传播;而频率处于禁带范围外的TM波由于不受光子禁带约束可在光子晶体平面内横向传播。

图4为结构优化的 $\Gamma$ -M方向波导的色散关系图, $K_z$ 为波矢沿 $\Gamma$ -M方向的分量。可以看到处于禁带中的频率都具有缺陷能带。这是由于在垂直方向的波导两旁引入了缺陷面,有效地扩展了缺陷模式的带宽。

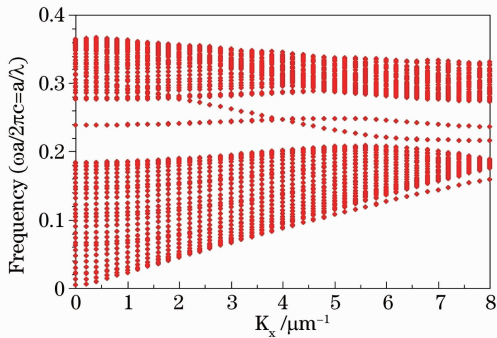


图3 光子晶体 $\Gamma$ -K波导的色散关系图

Fig. 3 Dispersion relation of the  $\Gamma$ -K photonic crystal waveguides

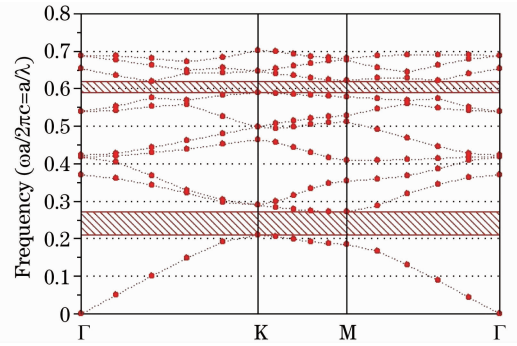


图2 周期为375 nm、半径为110 nm的光子晶体光子能带结构

Fig. 2 Photonic bandgap structure of photonic crystals with lattice constant of 375 nm and radius of 110 nm

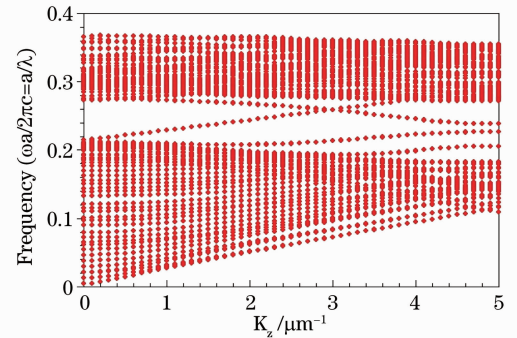


图4 光子晶体 $\Gamma$ -M波导的色散关系图

Fig. 4 Dispersion relation of the  $\Gamma$ -M photonic crystal waveguides

## 4 模拟和分析

为进一步了解弯曲波导的传输特性,采用时域有限差分法对以上3种结构进行了模拟分析。图5为波长1500 nm的TM波在3种结构中传播的电磁场图。图5(a)中,只有很少的电磁波可以从 $\Gamma$ -K波导传播到 $\Gamma$ -M波导,说明直角弯曲对于波的传播损耗很大;图5(b)、(c)中电磁波基本可以通过这两个弯曲结构进行传播,说明弧线弯曲可以有效地减少弯曲传播的损耗。

图6是3种结构的模拟透射谱。从monitor1曲线可以看到,初始结构的透射率很低,只在1620 nm旁边有个很窄的波峰,说明初始结构的工作波长范围很窄;从monitor2曲线可以看出,对比结构波导两旁的缺陷面可以有效地提高波导的透射率;而从monitor3曲线可以看出,由于优化结构具有光子晶体光子局域和波导两侧缺陷面引起的全内反射双重作用,所得透射率最高,但透射谱的宽度皆比 $\Gamma$ -K和 $\Gamma$ -M波导缺陷模式的带宽稍窄,这是由于受到了波导弯曲部分的一定影响。

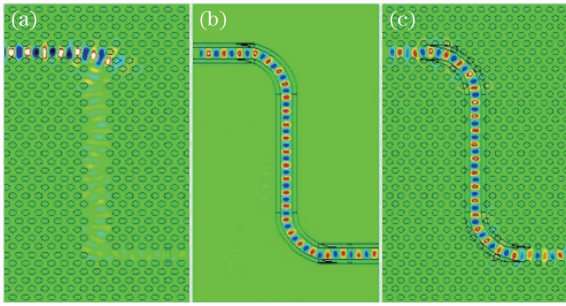


图5 二维三角晶格光子晶体弯曲波导中的TM波

Fig. 5 TM wave propagated in bend waveguide based on two-dimensional triangle lattice photonic crystals

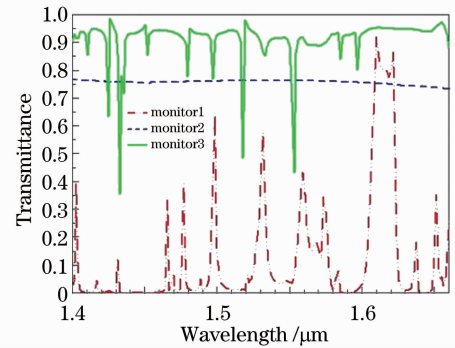


图6 基于二维三角晶格光子晶体弯曲波导的透射谱

Fig. 6 Transmission spectrum of bend waveguide based on the two-dimensional triangle lattice photonic crystal

## 5 结 论

在二维三角晶格光子晶体上设计了一种 $90^\circ$ 弧度弯曲波导。通过对初始结构、对比结构和优化结构进行能带计算和透射分析,弧线弯曲可以很好地减少电磁波转角传播的损耗,同时在 $\Gamma$ -M波导两侧引入缺陷面,因其具有扩展缺陷导模带宽和提高透射率的作用,所设计的基于二维三角晶格光子晶体 $90^\circ$ 弧线弯曲波导具有较高的传输品质,为光子集成光路的设计提供了更多的光学器件选择。

## 参 考 文 献

- 1 Yablonovitch E.. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1987, **58**(20): 2059~2062
- 2 John S.. Strong localization of photonics in certain disordered dielectric superlattices [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1987, **58**(23): 2486~2489
- 3 Ye Weimin. Introduction of Photonic Crystal [M]. Beijing: Science Press, 2010, 1~9  
叶卫民. 光子晶体导论 [M]. 北京: 科学出版社, 2010. 1~9
- 4 Yin Jianling, Huang Xuguang, Liu Songhao *et al.*. Effect of the structure shape on the 8-fold photonic quasicrystals [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(2): 567~571  
殷建岭, 黄旭光, 刘颂豪 等. 介质柱形状对准晶光子晶体带隙特性的影响 [J]. 中国激光, 2010, **37**(2): 567~571
- 5 Lu Xiaodong, Han Peide, Quan Yujun *et al.*. Influences of wave vector direction on energy bands and applications of two-dimensional photonic crystals [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(6): 770~774  
陆晓东, 韩培德, 全宇军. 波矢方向对二维光子晶体能带及应用的影响 [J]. 中国激光, 2006, **33**(6): 770~774
- 6 Guiqiang Liu, Yubo Liao, Zhongmin Liu *et al.*. Characteristic investigation of high quality three-dimensional photonic crystals fabricated by self-assembly: theory analysis, simulation and measurement [J]. *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.*, 2008, **10**(11): 115202
- 7 Ouyang Zhengbiao, Xu Guiwen, Sun Yiling *et al.*. Tuning characteristics of photonic crystal micro-resonators [J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2005, **16**(4): 399~401, 408  
欧阳征标, 许桂雯, 孙一翎 等. 光子晶体微谐振腔的调谐特性 [J]. 光电子·激光, 2005, **16**(4): 399~401, 408
- 8 M. Notomi, A. Shinya, S. Mitsugi *et al.*. Waveguides, resonators and their coupled elements in photonic crystal slabs [J]. *Opt. Express*, 2004, **12**(8): 1551~1561
- 9 Gao Yongfeng, Zhou Ming, Zhou Jun *et al.*. Design of power splitter by directional coupling between photonic crystal waveguides [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(5): 0505003  
高永锋, 周 明, 刘 骏 等. 光子晶体波导定向耦合功分器的设计 [J]. 中国激光, 2011, **38**(5): 0505003
- 10 C. J. M. Smith, R. M. De La Rue, M. Rattier *et al.*. Coupled guide and cavity in a two-dimensional photonic crystal [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2001, **78**(11): 1487~1489
- 11 Jiusheng Li, Jinlong He, Zhi Hong. Terahertz wave switch based on silicon photonic crystals [J]. *Appl. Opt.*, 2007, **46**(22): 5034~5037
- 12 E. R. Brown, C. D. Parker, E. Yablonovitch. Radiation properties of a planar antenna on a photonic-crystal substrate [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1993, **10**(2): 404~407

- 13 Attila Mekis, Shanhui Fan, J. D. Joannopoulos. Bound states in photonic crystal waveguides and waveguide bends[J]. *Phys. Rev. B*, 1998, **58**(8): 4809~4817
- 14 Alongkarn Chutinan, Susumu Noda. Waveguides and waveguide bends in two-dimensional photonic crystal slabs[J]. *Phys. Rev. B*, 2000, **62**(7): 4488~4492
- 15 Zhou Changzhu, Liu Yazhao, LI Zhiyuan. Waveguide bend of 90° in two-dimensional triangular lattice silicon photonic crystal slabs[J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2010, **27**(8): 084203
- 16 Zhang Yao, Li Baojun. Photonic crystal-based bending waveguides for optical interconnections[J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(12): 5723~5732
- 17 Ma Xiyang. Principle and Application of Photonic Crystal[M]. Beijing: Science Press, 2010. 13~45  
马锡英. 光子晶体原理及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2010. 13~45
- 18 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