

一种高效光子晶体偏振光分束器

周飞^{1,2} 费宏明^{1,2} 陈智辉^{1,2} 刘欣^{1,2} 杨毅彪^{1,2}¹ 太原理工大学新型传感器与智能控制教育部重点实验室, 山西 太原 030024² 太原理工大学物理与光电工程学院, 山西 太原 030024

摘要 基于不同结构的光子晶体具有不同禁带范围的特性,设计了一种光子晶体偏振光分束器,通过平面波展开法与时域有限差分法进行数值计算与模拟分析。结果表明,该分束器能够实现电磁波的高效分束:波长为 $1.5\sim 1.58\ \mu\text{m}$ 范围内电磁波入射时,TE模和TM模的透射率均高于92%;尤其是波长为 $1.55\ \mu\text{m}$ 的电磁波入射时,TE模透射率可达95.5%,TM模透射率可达99%。同时,其尺寸仅为 $10\ \mu\text{m}\times 11.5\ \mu\text{m}$ 。这些特性使其具有良好的应用前景。

关键词 光电子学;光子晶体偏振光分束器;平面波展开法;时域有限差分法

中图分类号 O734 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP50.062304

A High Efficiency Photonic Crystal Polarization Beam Splitter

Zhou Fei^{1,2} Fei Hongming^{1,2} Chen Zhihui^{1,2} Liu Xin^{1,2} Yang Yibiao^{1,2}¹ Key Laboratory of Advanced Transducers and Intelligent Control System, Ministry of Education,

Taiyuan University of Technology, Taiyuan, Shanxi 030024, China

² Department of Physics and Optoelectronics, Taiyuan University of Technology, Taiyuan, Shanxi 030024, China

Abstract The design of a polarization beam splitter(PBS) is presented according to different band gaps with different photonic crystals. The splitting properties of the PBS are numerically simulated and analyzed by using the finite-difference time-domain method and the plane wave expansion method. It is shown that a highly efficient splitting for TE mode and TM mode can be achieved. The transmission probability is above 92% for both TE mode and TM mode while the incident wave is Gaussian and the wavelength range is $1.5\sim 1.58\ \mu\text{m}$. Especially the transmission probability can reach 95.5% for TE mode and 99% for TM mode the $1.55\ \mu\text{m}$ Gaussian incidence. Meanwhile, its size is only $10\ \mu\text{m}\times 11.5\ \mu\text{m}$. The PBS makes a promising candidate in the future integrated optical circuit.

Key words optoelectronics; photonic crystal polarization beam splitter; plane wave expansion method; finite difference time domain method

OCIS codes 230.5298; 250.5300; 160.5298

1 引言

光子晶体是一种由介电常数不同的材料在空间上周期性排列形成的结构,具有光子禁带和光子局域特性。在光子晶体中引入缺陷可改变光子晶体原有的特性。近年来,光子晶体材料与制作工艺的不断发展提高了对光波的可控性。利用光子晶体特性已制作出多种光电子元件,如光滤波器^[1]、光开关^[2~4]、光子晶体光纤^[5,6]和偏振光分束器^[7]等。

光子晶体偏振光分束器是组成光集成、光网络的重要光学元器件,其能够将电磁波的两两相互正交偏振模式分开。目前基于光子晶体设计的偏振光分束器已得到广泛研究。2003年, Kim等^[8]提出一种传统介质波导和光子晶体结合的复合结构,实现了偏振光分束;随后有人提出,利用光子晶体的自准直效应^[9,10]可以

收稿日期: 2013-03-26; **收到修改稿日期**: 2013-04-08; **网络出版日期**: 2013-05-22

基金项目: 国家自然科学基金(11247277)和山西省自然科学基金(2011011003-1)资助课题。

作者简介: 周飞(1986—),男,硕士研究生,主要从事光子晶体器件设计方面的研究。E-mail: zhoufei879@163.com

导师简介: 费宏明(1982—),女,博士,副教授,主要从事光子晶体理论与器件设计等方面的研究。

E-mail: feihm187491@126.com(通信联系人)

实现电磁波偏振模分束;2009年,郑改革等^[11]基于二维光子晶体的定向耦合效应设计了可以任意弯曲的偏振光分束器;这类光子晶体分束器透射率较低,需要引入额外条件才能提高分束效果^[12]。2005年,Kalra等^[13]提出利用光子晶体完全禁带特性可实现偏振光分束,而且不需要引入额外条件,这大大提高了光子晶体在偏振光分束器中的应用。2010年,郭浩等^[14]基于光波的直波导和混合结构光子晶体的传播特性提出了一种偏振光分束器实现了电磁波的分束,但分束器尺寸及透射率还有改善空间。

本文基于不同结构的光子晶体具有不同光子禁带的特性,在光子晶体中引入缺陷,设计了一种光子晶体偏振光分束器,通过在拐角处引入缺陷,提高电磁波透射率。模拟计算表明该分束器能够实现TE模与TM模的分束,且具有高效、小尺寸的特点,在未来的光路中具有实际的应用价值。

2 数值计算及分析讨论

研究光子晶体的计算方法有多种,如平面波展开法^[15]、时域有限差分法^[16]、多重散射法^[17]等。平面波展开法是将电磁场以平面波的形式展开,将麦克斯韦方程组转化为一个本征方程,通过求解本征方程的本征值得到电磁波传播的本征频率^[14],将一系列波矢所得到的本征频率连接起来,构成光子晶体能带结构。本文通过平面波展开法对正方晶格和三角晶格光子晶体的能带进行分析,得到相互正交的TE模和TM模电磁波在不同结构光子晶体中的禁带范围,为设计光子晶体偏振光分束器提供理论依据。

采用时域有限差分法对光子晶体偏振光分束器中每点的电场幅度分布进行分析。时域有限差分法是将麦克斯韦方程进行离散化处理,将麦克斯韦方程中时间变量与空间变量微分方程转化为差分方程,模拟光子晶体偏振光分束器中每点电场幅度随时间的变换值,通过傅里叶变换得到电场幅度随频率变化的关系。

为实现TE模与TM模的分束,选取折射率为4.3的锗材料作为背景材料,在其上引入空气孔,孔直径为 $0.715\ \mu\text{m}$,晶格常数为 $a=0.76\ \mu\text{m}$ 。通过引入缺陷形成光子晶体偏振光分束器,如图1所示,光子晶体偏振光分束器由光子晶体波导、分束结构A、分束结构B及缺陷C组成,其中,光子晶体波导是引入的线缺陷,分束结构A为正方晶格空气孔,分束结构B为三角晶格空气孔,C为光子晶体偏振光分束器拐角处引入的两个空气孔缺陷。

通过平面波展开法计算光子晶体带隙结构,得到三角晶格光子晶体[图2(a)]与正方晶格光子晶体[图2(b)]归一化频率与空气柱半径的关系。从图2(a)可知,在三角晶格光子晶体中,当归一化频率 a/λ 为 $0.416\sim 0.503$,空气孔半径为 $0.275\sim 0.311\ \mu\text{m}$ 时,TE模为禁带,TM模为导带;当归一化频率 a/λ 为 $0.297\sim 0.537$,空气孔半径为 $0.305\sim 0.530\ \mu\text{m}$ 时,TE模与TM模均为禁带。从图2(b)可知,在正方晶格光子晶体中,当归一化频率 a/λ 为

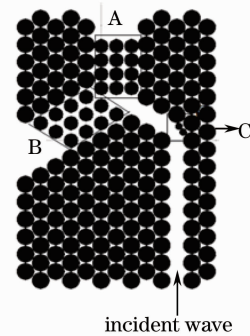


图1 光子晶体分束器结构

Fig. 1 Structure of two-dimensional photonic crystal beam splitter

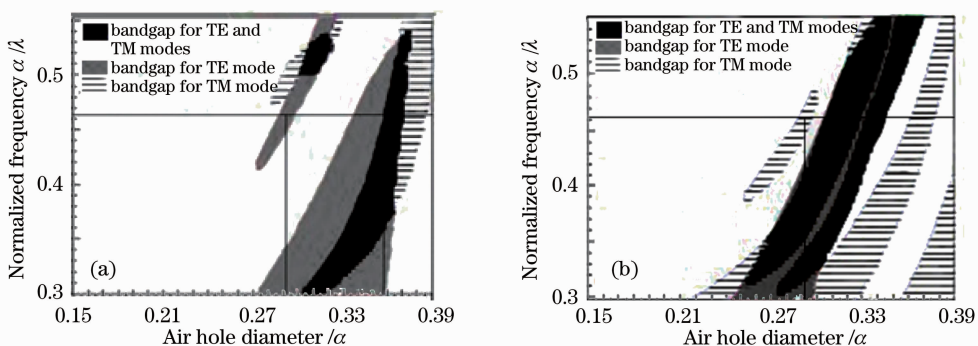


图2 光子晶体中归一化频率与空气柱半径关系。(a)三角晶格;(b)正方晶格

Fig. 2 Relation between the normalized constant and the hole radius. (a) Triangular lattice; (b) tetragonal lattice

0.39~0.482,空气孔半径为0.255~0.298 μm 时, TM 模为禁带, TE 模为导带。

根据图 2 的分析,我们设计了一种光子晶体偏振光分束器结构:在空气孔半径为 0.35 μm 的三角光子晶体中引入光子晶体波导,如图 1 所示,TE 模和 TM 模电磁波在光子晶体波导中实现低损耗传输;为实现 TE 模和 TM 模分离,在传输路径两个支路上引入分束结构 A 和 B,形成一个二维光子晶体偏振光分束器结构,其中结构 A 为空气孔半径为 0.285 μm 的正方晶格,结构 B 为空气孔半径为 0.285 μm 的三角晶格。当归一化频率为 $\alpha/\lambda=0.461$ 的高斯脉冲入射且入射波长为 1.55 μm 时,TE 模只能从分束结构 A 透射, TM 模只能从分束结构 B 透射,实现了 TE 模与 TM 模的分束效果,且该光子晶体偏振光分束器尺寸为 10 $\mu\text{m}\times 11.5 \mu\text{m}$ 。

电磁波垂直射入光子晶体偏振光分束器,如图 1 所示,到达分束结构 A、B 前沿光子晶体波导传播。电磁波在光子晶体直波导中几乎是无损传播,但在波导中有拐角时,由于拐角处存在反射,直接导致光子晶体器件的透射率降低。在光子晶体波导拐角处引入空气孔缺陷,如图 3 所示,并选择该缺陷空气柱半径为 0.152 μm 。

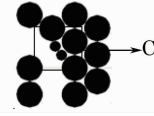


图 3 光子晶体波导拐角处缺陷

Fig. 3 Defect in the photonic crystal waveguide corner

为了检验设计的光子晶体偏振光分束器中的分束特性,通过时域有限差分法对电磁波在该分束器传播过程中的电场强度分布进行了模拟,选择归一化频率 $\alpha/\lambda=0.461$ 的高斯脉冲,图 4 所示为电场强度幅度分布图,从图中可以看到 TE 模只从 A 结构中透射[图 4(b)], TM 模只从 B 结构中透射[图 4(a)],从而实现了 TE 模与 TM 模的分束。

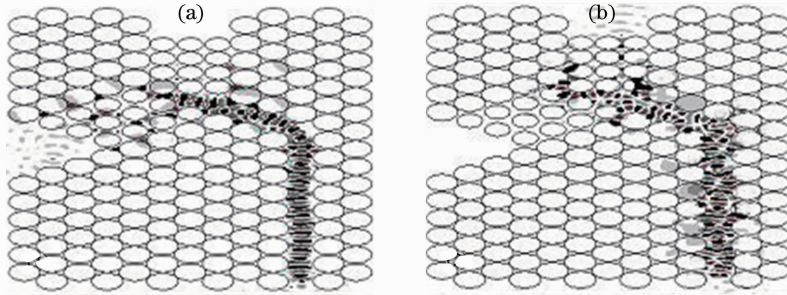


图 4 归一化频率 $\alpha/\lambda=0.461$ 处,电磁场达到稳定时的场分布。(a) TM 模; (b) TE 模

Fig. 4 Distribution of electromagnetic field when $\alpha/\lambda=0.461$. (a) TM mode; (b) TE mode

通过研究分束器结构 A、B 的消光比和透射率研究光子晶体偏振光分束器的分束效果。消光比是同一分束结构输出的两种偏振模式能量的比值。端口 A 和端口 B 的偏振消光比分别定义为^[18]

$$R^A = 10\lg \frac{T_{TE}^A}{T_{TM}^A}, \quad (1)$$

$$R^B = 10\lg \frac{T_{TM}^B}{T_{TE}^B}, \quad (2)$$

式中 T_{TE}^A 、 T_{TM}^A 和 T_{TE}^B 、 T_{TM}^B 分别表示分束结构 A、B 的 TE 偏振和 TM 偏振模式的透射率。图 5 为光子晶体偏振光分束器 A、B 在工作波长范围内的消光比,从图中可知波长为 1.55 μm 的电磁波入射时,分束结构 A 消光比为 20.8 dB,分束结构 B 消光比为 13.3 dB。

对 TE 模和 TM 模的电磁波通过该光子晶体偏振光分束器的透射率与入射电磁波波长的关系进行了分析。首先对拐角处未引入光子晶体缺陷 C 时的光子晶体偏振光分束器透射率进行了分析,如图 6 所示。从图中可知,波长为 1.55 μm 的电磁波入射时,TE 模的透射率为 87.5%, TM 模的透射率为 94.2%,透射率较低。为提高

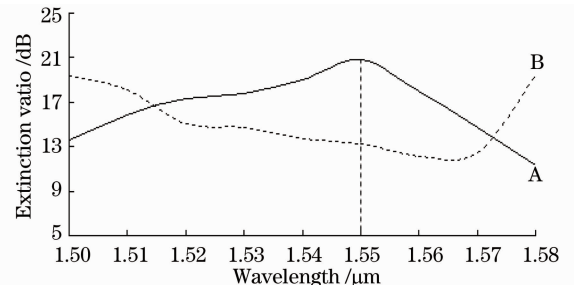


图 5 光子晶体偏振光分束器消光比

Fig. 5 Extinction ratio of photonic crystal polarization beam splitter

该光子晶体偏振光分束器的透射率,在光子晶体波导拐角处引入缺陷 C(图 3),透射率如图 7 所示。从图中可以看到,波长在 $1.5\sim 1.58\ \mu\text{m}$ 范围内的电磁波垂直入射时,TE 模与 TM 模透射率均高于 92%,波长为 $1.55\ \mu\text{m}$ 的电磁波垂直入射时,TE 模透射率可达 95.5%,TM 模透射率可达 99%,实现了 TE 模与 TM 模的高效分束。

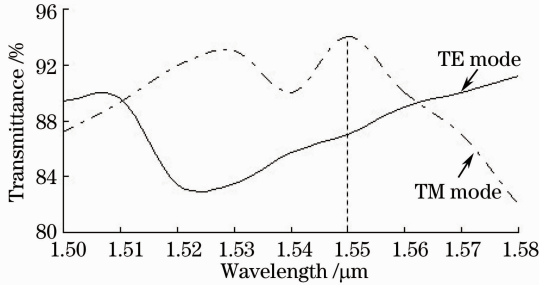


图 6 光子晶体偏振光分束器拐角处无缺陷时
电磁波透射率与入射波长的关系

Fig. 6 Relation between electromagnetic wave transmission and incident wavelength in photonic crystal polarization beam splitter without defect in the corner

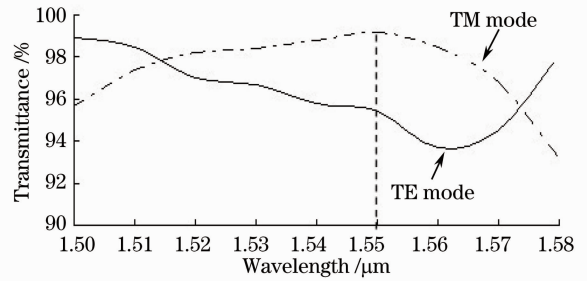


图 7 光子晶体偏振光分束器拐角处有缺陷时
电磁波透射率与入射波长关系

Fig. 7 Relation between electromagnetic wave transmission and incident wavelength in photonic crystal polarization beam splitter with defects in the corner

3 结 论

基于不同结构的光子晶体具有不同禁带范围的特性,设计了一种光子晶体偏振光分束器。通过平面波展开法与时域有限差分法计算与模拟表明:波长在 $1.5\sim 1.58\ \mu\text{m}$ 范围内的电磁波入射时,TE 模与 TM 模不仅可实现分束,且透射率均高于 92%;波长为 $1.55\ \mu\text{m}$ 的电磁波入射时,TE 模透射率可达 95.5%,TM 模透射率可达 99%。该分束器能够实现 TE 模与 TM 模的高效分束,且具有小尺寸的优点,在未来的光电器件中有较高的应用价值。

参 考 文 献

- 1 H. Takano, Y. A. Kanane, T. Asano. In-plane-type channel drop filter in a two-dimensional photonic crystal slab[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2004, **81**(13): 2226~2228
- 2 S. F. Cuesta, A. Martinez, J. Garcia. All-optical switching structure based on a photonic crystal directional coupler[J]. *Opt. Express*, 2004, **12**(1): 161~167
- 3 Li Lei, Liu Guiqiang, Chen Yuanhao. An optical switch based on coupled heterostructure photonic-crystal waveguides[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, **33**(1): 0123002
黎磊,刘桂强,陈元浩.光子晶体异质结构耦合波导光开关[J].*光学学报*, 2013, **33**(1): 0123002
- 4 Yang Hui, Wang Zhiyong, Zhang Wei *et al.*. Properties of all-optical switch based on two-dimensional nonlinear photonic crystals[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(10): 1016003
杨辉,王智勇,张伟等.基于二维非线性光子晶体的全光开关特性[J].*光学学报*, 2012, **32**(10): 1016003
- 5 Yu Chongxiu, Yuan Jinhui, Shen Xiangwei. Recent progress of study on photonic crystal fiber[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(9): 0900139
余重秀,苑金辉,申向伟.光子晶体光纤的研究新进展[J].*光学学报*, 2011, **31**(9): 0900139
- 6 Zheng Hongjun, Wu Chongqing, Wang Jian *et al.*. A novel single-polarization single-mode photonic crystal fiber with two arrays of four lines of semiminor-axis-decreasing elliptical air-holes[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(8): 0806003
郑宏军,吴重庆,王健等.一种四排短轴渐减椭圆空气孔阵列的单模单偏振光子晶体光纤[J].*光学学报*, 2011, **31**(8): 0806003
- 7 Chen Shuwen, Zhu Guixin, Yu Tianbao *et al.*. 1×3 beam splitter based on photonic crystal waveguides directional coupler [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(10): 2898~2904
陈淑文,朱桂新,于天宝等.光子晶体波导定向耦合型 1×3 光分束器[J].*光学学报*, 2009, **29**(10): 2898~2904
- 8 S. Kim, G. P. Nordin, J. B. Cai *et al.*. Ultracompact high-efficiency polarizing beam splitter with a hybrid photonic crystal and conventional waveguide structure[J]. *Opt. Lett.*, 2003, **28**(23): 2384~2386
- 9 Li Yiyu, Gu Peifu, Li Mingyu. Design of wide-angle and broad-band two-dimensional photonic crystal polarization splitter by the automatic shaping mechanism[J]. *Acta Physica Sinica*, 2005, **54**(8): 3889~3893

- 历以宇, 顾培夫, 李明宇. 利用基于自动复形技术的二维光子晶体模型设计宽角度宽波长偏振分束器[J]. *物理学报*, 2005, **54**(8): 3889~3893
- 10 Shen Xiaopeng, Han Kui, Li Haipeng *et al.*. Polarization beam splitter for self-collimated beams in photonic crystals[J]. *Acta Physica Sinica*, 2008, **57**(3): 1737~1741
沈晓鹏, 韩奎, 李海鹏等. 光子晶体自准直光束偏振光分束器[J]. *物理学报*, 2008, **57**(3): 1737~1741
- 11 Zheng Gaige, Li Guoping, Jiang Liyong *et al.*. Arbitrarily bent beam splitter using photonic crystal co-directional coupling mechanism[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(6): 1649~1652
郑改革, 李国萍, 蒋立勇等. 基于定向耦合效应设计可以任意弯曲的二维光子晶体分束器[J]. *光学学报*, 2009, **29**(6): 1649~1652
- 12 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
高永峰, 周明, 周骏等. 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
- 13 Y. Kalra, R. K. Sinha. Design of ultra compact polarization splitter based on the complete photonic band gap[J]. *Opt. Quantum Electron.*, 2005, **37**(9): 889~895
- 14 Guo Hao, Wu Ping, Yu Tianbao *et al.*. Design of novel polarization beam splitter in two-dimensional photonic crystal[J]. *Acta Physica Sinica*, 2010, **59**(8): 5547~5552
郭浩, 吴评, 于天宝等. 一种新型的光子晶体偏振光分束器的设计[J]. *物理学报*, 2010, **59**(8): 5547~5552
- 15 E. Schonbrun, Q. Wu, W. Park *et al.*. Polarization beam splitter based on a photonic crystal heterostructure[J]. *Opt. Lett.*, 2006, **31**(21): 3104~3106
- 16 K. Yee. Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media[J]. *IEEE Trans. Antennas and Propagation*, 1966, **14**(3): 302~307
- 17 K. M. Leung, Y. Qiu. Multiple-scattering calculation of the two-dimensional photonic band structure[J]. *Phys. Rev. B*, 1993, **48**(11): 7767~7771
- 18 Chen Haibin, Xu Ying, He Jinlong *et al.*. A polarization splitter based on self-imaging phenomena in an anisotropic photonic crystal with an absolute photonic band gap[J]. *Opt. Commun.*, 2009, **282**(17): 3626~3629