

doi:10.3788/gzxb20124112.1470

二维三角晶格光子晶体三通道解波分复用器

唐发林, 刘桂强, 黎磊, 龚丽霞, 陈元浩, 黄宽

(江西师范大学 物理与通信电子学院; 江西省光电子与通信重点实验室, 南昌 330022)

摘 要: 为了实现结构紧凑、高透射率的解波分复用功能, 在二维三角晶格光子晶体平板上设计了一个 ψ 形的三通道解波分复用器. 通过在该光子晶体结构中引入合适的线缺陷和点缺陷, 使得在光子禁带中出现了局域缺陷态. 利用该缺陷态模式, 可以控制波的传播和耦合, 从而实现解波分复用的功能. 通过用平面波扩展法和时域有限差分法对此解波分复用器进行了能带和传输特性分析, 找到了具有合适缺陷态频率的光子晶体结构参量, 实现了透过率高达 80% 的解波分复用功能.

关键词: 光子晶体; 波导; 谐振腔; 光子禁带; 缺陷态; 色散; 透射率

中图分类号: O472+.3

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2012)12-1470-4

0 引言

光子晶体是由介电常量不同的介质材料在空间呈周期排列而成的人工微结构. 自 1987 年 Yablonovitch^[1] 和 John^[2] 提出光子晶体这一概念以来, 关于光子晶体的理论和应用研究成为当今的热点之一. 光子晶体由于特殊的周期结构而显示出类似于电子的能带结构, 这种能带结构称为光子能带 (photonic energy band). 在光子晶体的光子能带间可出现使某些频率的电磁波完全不能透过的频率区域^[3-4], 该频率区域称为光子带隙 (Photonic Band Gap, PBG), 这是光子晶体的一个主要特性.

光子局域是光子晶体的另一个主要特性. 当光子晶体中引入某种缺陷时, 与缺陷态频率吻合的光子被限制在缺陷位置, 一旦偏离缺陷处, 就进入频率禁带而禁止传播. 由于光子晶体的这些特性, 使其对光子具有很强的控制能力, 因而在制作光子晶体波导、谐振腔、光纤、光开关等光学设备具有广阔的应用前景^[5-13].

本文在由 Si 介质柱组成的二维三角晶格光子晶体中, 通过引入合适的线缺陷和点缺陷, 设计了一个 ψ 形三通道解波分复用器. 由于引入了线缺陷和点缺陷, 使得在光子晶体光子禁带中出现了局域缺陷态, 通过利用这些缺陷的缺陷态模式, 控制波的传播和耦合^[14-15], 从而达到实现解波分复用的功能.

1 结构设计

本文设计的 ψ 形三通道解波分复用器是通过

利用三个谐振腔把光波分别耦合到三个相应的波导中, 从而实现解波分复用功能. 图 1 是基于二维三角晶格的光子晶体结构, 该光子晶体是由相对介电常量为 11.56 的 Si 介质柱组成, 晶格周期 Δ 为 600 nm, 介质柱半径 R 为 120 nm. 波导是通过移除一行介质柱而形成的. 谐振腔 1 是由中间 1 个点缺陷和周围 8 个半径 r_1 为 95 nm 的介质柱组成, 其作用是把相应频率的波耦合到上行波导中; 谐振腔 2 是由中间 1 个半径 r_2 为 25 nm 和周围 8 个半径 r_3 为 105 nm 介质柱组成, 其作用是把相应频率的波耦合到下行波导中; 谐振腔 3 是由中间 1 个半径 r_4

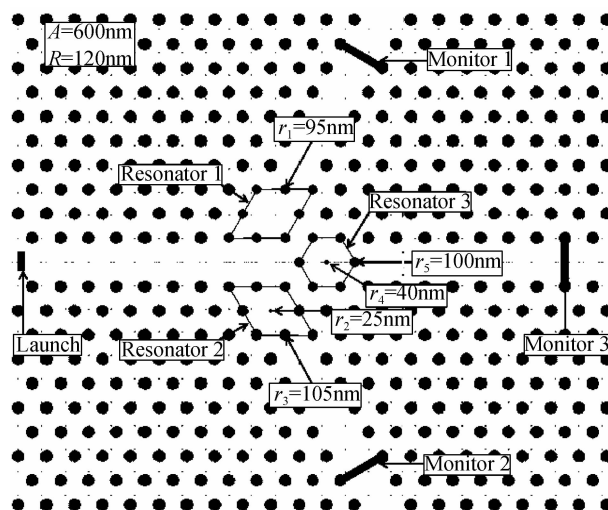


图 1 基于二维三角晶格光子晶体的 ψ 形三通道解波分复用器的结构图

Fig. 1 ψ -shape three-channel wavelength division multiplexing device based on two-dimensional triangle lattice photonic crystals

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 11004088, No. 11264017)、江西省自然科学基金 (No. 2010GQW0025, No. 20122BAB202006)、江西省科技支撑项目 (No. 20112BBE50033) 和江西省教育厅科技项目 (No. GJJ10099) 资助

第一作者: 唐发林 (1984-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为光子晶体. Email: tangkailin@163.com

导师 (通讯作者): 刘桂强 (1977-), 女, 副教授, 博士, 主要研究方向为光电技术及光子晶体. Email: liougq@yahoo.com.cn

收稿日期: 2012-06-20; **修回日期:** 2012-08-20

为 40 nm 和周围 6 个半径 r_5 为 100 nm 的介质柱组成,其作用是把相应频率的波耦合到右行波导中. 这样,通过三个谐振腔把入射波导中相应频率的波分别耦合到上行、下行和右行波导中,从而实现解波分复用的作用.

2 能带分析

目前,研究光子晶体的晶体结构和能带结构方面主要有三种计算方法:平面波扩展法(Plane-Wave Expansion, PWE)、传输矩阵法(Transfer Matrix Method, TMM)和时域有限差分法(Finite Difference Time Domain Method, FDTD). 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 Maxwell 方程组化为一个本征方程,求解本征值即可得到光子能带. 传输矩阵法是使电磁场在实空间展开,将 Maxwell 方程组转化为传播矩阵形式,求解本征值,对处理有杂质的光子晶体更为有效. 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,引入吸收边界条件,将 Maxwell 方程转化成迭代形式方程求解^[16]. 对于光子晶体,求解光子能带结构问题时用平面波扩展法更为有效,而在求解透射谱问题时则经常采用时域有限差分法.

2.1 光子禁带

由于光子晶体具有光子禁带,从而使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. 这个属性可以有效地减少传播信号的损失,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 为本文由 Si 介质柱组成的二维三角晶格光子晶体的光子能带结构图,从图中可以看到光子

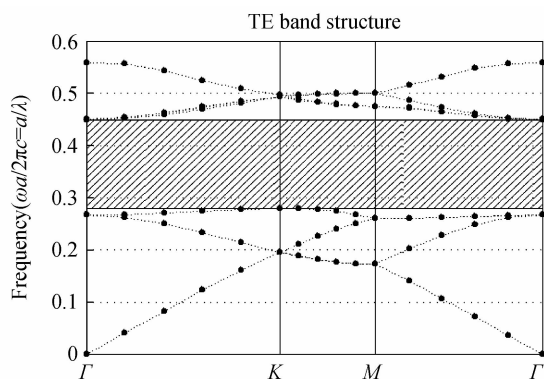


图 2 周期 A 为 600 nm 半径 R 为 120 nm 光子晶体的光子能带结构

Fig. 2 Photonic bandgap structure of photonic crystals. Lattice constant A is 600 nm and radius R is 120 nm

晶体具有一个 TE 波的光子禁带,所以这个结构所讨论的波皆为 TE 波,光子禁带的归一化频率为 0.28~0.45 之间. 也就是说,光子晶体对这个频率范围内的 TE 波起到禁止传播的作用,而频率处于禁带范围外的 TE 波则可通过光子晶体传播.

2.2 波导色散关系

在光子晶体中引入线缺陷后,如果缺陷模式频率刚好位于光子禁带中,那么光子晶体的线缺陷可以将模式线性地局域在带隙内实现几乎无损失的传播^[17].

图 3 为图 1 中波导的色散关系图,从图中可以看到只有归一化频率为 0.34~0.45 之间的禁带中具有缺陷能带. 也就是说,只有这个频率的 TE 波可以在波导中传播;对于归一化频率为 0.28~0.34 的 TE 波则会局域在光子晶体和波导中,但不能传播;而频率处于禁带范围 0.28~0.45 外的 TE 波则可通过光子晶体.

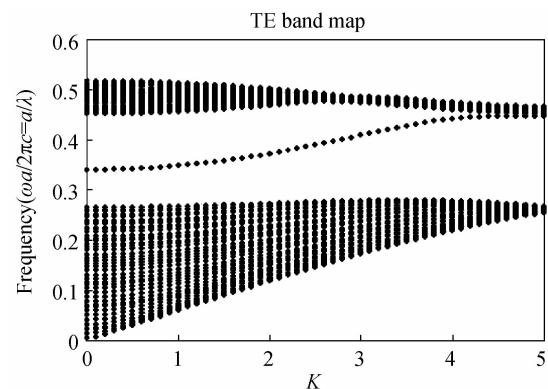


图 3 光子晶体波导的色散关系图

Fig. 3 Dispersion relationship of photonic crystal waveguide

2.3 谐振腔的缺陷态

在光子晶体中引入点缺陷后也会出现缺陷态,这里就是通过引入点缺陷后得到谐振腔. 谐振腔缺陷态的频率主要由中间缺陷介质柱的半径决定,这里谐振腔 1、2 和 3 的中间介质柱半径分别为 0、 r_2 和 r_4 . 同时周围介质柱的半径对缺陷模式频率的大小也有重要影响,故谐振腔 1、2 和 3 的周围介质柱半径也有改变,分别为 r_1 、 r_3 和 r_5 . 本文同时改变中间介质柱和周围介质柱的半径就是为了得到合适的缺陷态频率,使缺陷态频率同时落在光子带隙 0.34~0.45 内但又相互之间不重叠,从而实现解波分复用的功能.

图 4 为解波分复用器的三个谐振腔所具有的缺陷态,可以看到基本为直线,归一化中心频率分别为 0.416、0.397 和 0.381. 也就是说,这三个频率的 TE 波可以分别在三个谐振腔中实现共振.

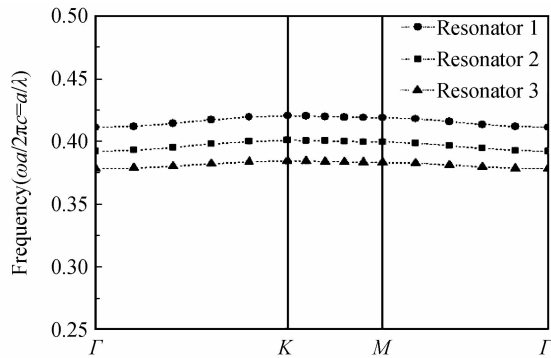


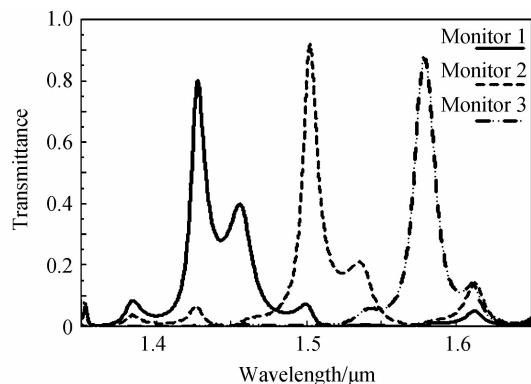
图4 光子晶体谐振腔的缺陷态

Fig.4 Defect mode of photonic crystal resonators

3 模拟结果及分析

为了了解此解波分复用器的传输特性,本文采用时域有限差分法进行了模拟分析。

图5为其透射谱,从中可以看到三个波峰,分别对应着三个耦合效率.最大值所对应的波长分别1 428 nm、1 502 nm和1 578 nm,对应的归一化频率为0.420、0.399和0.380,与前面分析的谐振腔缺陷态的归一化中心频率基本吻合.而在三个波峰的旁边出现了小波峰,这是由于三个谐振腔之间互有影响,从而出现了小幅度的扰动。

图5 基于二维三角晶格光子晶体的 ϕ 形三通道波分复用器的透射谱Fig.5 Transmission spectrum of ϕ -shape three-channel wavelength division multiplexing device based on the two-dimensional triangle lattice photonic crystals

4 结论

本文是在二维三角晶格光子晶体(Si介质柱)上设计了一个 ϕ 形的三通道解波分复用器,并用平面波扩展法和时域有限差分法对其进行了能带和传输特性分析.在该光子晶体结构中引入合适的线缺陷和点缺陷,使得在光子禁带中出现了局域缺陷态,通过利用缺陷的缺陷态模式,控制波的传播和耦合,从而实现解波分复用的功能。

在实际中可以改变介电常量比、晶格常量和填充率等来改变光子禁带,也可以通过改变不同的缺

陷来得到不同的缺陷态,从而制作出不同的物理性能的光学器件。

参考文献

- [1] YABLONOVITCH E. Inhibited spontaneous emission in solid-State physics and electronics[J]. *Physical Review Letters*, 1987, **58**(20): 2059-2062.
- [2] JOHN S. Strong localization of photonics in certain disordered dielectric superlattices[J]. *Physical Review Letters*, 1987, **58**(23): 2486-2489.
- [3] LIU Gui-qiang, LIAO Yu-bo, LIU Zhong-min, *et al.* Characteristic investigation of high quality three-dimensional photonic crystals fabricated by self-assembly: theory analysis, simulation and measurement[J]. *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*, 2008, **10**(11): 115202.
- [4] LIU Gui-qiang, LIAO Yu-bo, LIU Zhong-min. Fabrication and transmittance spectra of high quality three-dimensional photonic crystals[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(12): 2400-2403.
刘桂强, 廖昱博, 刘忠民. 高质量三维光子晶体的制备及其透射谱研究[J]. *光学学报*, 2008, **28**(12): 2400-2403.
- [5] ODA H, INOUE K, TANAKA Y, *et al.* Self-phase modulation in photonic-crystal-slab line-defect waveguides[J]. *Applied Physics Letters*, 2007, **90**(23): 231102.
- [6] GUR I, FROMER N A, CHEN Chih-ping, *et al.* Hybrid solar cells with prescribed nanoscale morphologies based on hyperbranched semiconductor nanocrystals[J]. *Nano Letters*, 2007, **7**(2): 409-414.
- [7] ZHU Zhi-hong, YE Wei-min, JI Jia-rong, *et al.* Analysis of photonic crystal filter[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(6): 700-703.
朱志宏, 叶卫民, 季家熔, 等. 光子晶体滤波特性分析[J]. *光子学报*, 2004, **33**(6): 700-703.
- [8] YANIK M F, FAN Shan-hui, SOLJACIC M. High-contrast all-optical bistable switching in photonic crystal microcavities [J]. *Applied Physics Letters*, 2003, **83**(14): 2739-2741.
- [9] HE Zhong-jiao. Rectangular-hole photonic crystal fibers[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **40**(4): 583-586.
何忠蛟. 矩形孔光子晶体光纤[J]. *光子学报*, 2010, **40**(4): 583-586.
- [10] TOADER O, JOHN S, BUSCH K. Optical trapping, field enhancement and laser cooling in photonic crystals[J]. *Optics Express*, 2001, **8**(3): 217-222.
- [11] CHEN Ming, LI Chun-fei, XU Mai, *et al.* Optical switch and bistability based on nonlinear one-dimensional photonic crystals[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(1): 98-101.
陈明, 李淳飞, 徐迈, 等. 非线性一维光子晶体光开关与光双稳[J]. *光子学报*, 2005, **34**(1): 98-101.
- [12] SHANKAR K, MOR G K, PRAKASAM H E, *et al.* Self-assembled hybrid polymer-TiO₂ nanotube array heterojunction solar cells [J]. *Langmuir*, 2007, **23**(24): 12445-12449.
- [13] LI Jiu-sheng, HE Jin-long, HONG Zhi. Terahertz wave switch based on silicon photonic crystals [J]. *Applied Optics*, 2007, **46**(22): 5034-5037.
- [14] SMITH C J M, DELARUE R M, RATTIER M, *et al.* Coupled guide and cavity in a two-dimensional photonic crystal[J]. *Physical Review Letters*, 2001, **78**(11): 1487-1489.
- [15] LIU Qi-neng. Resonance theory of the defect mode of 1-D doping photonic crystal[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **41**(4): 446-450.
刘启能. 一维掺杂光子晶体缺陷模的共振理论[J]. *光子学*

- 报, 2012, **41**(4): 446-450.
- [16] 马锡英. 光子晶体原理及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2010: 13-45.
- [17] CHUTINAN A, NODA S. Waveguides and waveguide bends in two-dimensional photonic crystal slabs [J]. *Physical Review B*, 2000, **62**(7): 4488-4492.

Three Channels Wavelength Division Multiplexing of Two-dimensional Triangular Lattice Photonic Crystals

TANG Fa-lin, LIU Gui-qiang, LI Lei, GONG Li-xia, CHEN Yuan-hao, HUANG Kuan
(*Institute of Physics and Communication Engineering; Jiangxi Provincial Key Laboratory of Optoelectronic and Communication, Nanchang 330022, China*)

Abstract: In order to realize the function of wavelength division multiplexing(WDM) device with compact structure and high transmittance, a ψ -shape three-channel wavelength division multiplexing device is designed on the triangle lattice photonic crystals which are composed of Si medium columns. Defect modes are produced in the photonic band gap by the introduction of line defects a point defects, the propagation and coupling of light in the photonic crystals are controlled by taking advantage of the defect modes, and the function of solution WDM are thus realized. The band gap and transmission characteristic of the solution WDM were analysed using plane-wave expansion and finite deference time domain method. The parameters of photonic crystal structure with proper defect mode frequency were found and the function of solution WDM with transmittance of 80% was realized.

Key words: Photonic crystals; Wave guides; Resonant cavities; Photonic band gaps; Defect modes; Dispersion; Transmittance