

多系双局域态光子晶体的可调谐滤波特性分析

朱奇光 董昕宇 王春芳 王宁 陈卫东

Tunable filtering properties of the polyphyly photonic crystal with double local states

Zhu Qi-Guang Dong Xin-Yu Wang Chun-Fang Wang Ning Chen Wei-Dong

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 034209 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.034209

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.034209>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I3>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

多孔氧化铝薄膜的光致发光起源: 三种缺陷中心

Origin of nanopore alumina film photoluminescence: three kinds of defect centers

物理学报.2014, 63(24): 247802 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.247802>

对称双缺陷光子晶体的可调谐滤波特性分析

Analysis of the tunable filtering properties of a photonic crystal with symmetric dual defects

物理学报.2014, 63(15): 154207 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.154207>

双包层大模场面积保偏掺镱光子晶体光纤研究

Double-clad large-mode-area polarization-maintaining ytterbium doped photonic crystal fiber

物理学报.2014, 63(2): 024202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.024202>

多芯光子晶体光纤优化掺杂分布实现同相位超模输出

Numerical analysis of in-phase supermode selection of seven-core photonic crystal fiber by gain distribution

物理学报.2014, 63(1): 014204 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.014204>

新型单模大模场红外硫系玻璃光子晶体光纤设计研究

Design of a novel single-mode large mode area infrared chalcogenide glass photonic crystal fibers

物理学报.2013, 62(8): 084206 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.084206>

多系双局域态光子晶体的可调谐滤波特性分析*

朱奇光¹⁾ 董昕宇¹⁾ 王春芳²⁾ 王宁¹⁾ 陈卫东^{1)†}

1)(燕山大学信息科学与工程学院, 河北省特种光纤与光纤传感器重点实验室, 秦皇岛 066004)

2)(燕山大学里仁学院, 秦皇岛 066004)

(2014年5月22日收到; 2014年9月11日收到修改稿)

利用紧束缚方法分析了双局域态光子晶体产生双缺陷模的机理, 采用传输矩阵法研究了一维光子晶体的光学传输特性, 并得到了透射谱与晶体结构参数的关系, 在此基础上讨论了光子晶体在受到单轴应力时所表现出的介观压光效应, 据此设计了一种结构简单的应力调制的近红外波段的多通道滤波结构. 通过数值模拟可以看出, 随着各介质层折射率或厚度的增加, 缺陷模发生红移. 当对多系双局域态光子晶体施加单轴拉伸应力时, 各缺陷峰都向长波长移动, 且缺陷峰峰值基本不变. 经过数值拟合, 缺陷峰中心波长与对光子晶体施加单轴拉伸应力所产生的应变呈线性关系. 该滤波器结构简单、可调谐性好, 在一系列精巧的光子晶体激光器、波分复用器或者其他精密仪器的制造中有一定的应用价值.

关键词: 光子晶体, 双局域态, 介观压光, 紧束缚方法

PACS: 42.55.Tv, 63.20.Pw, 78.66.-w, 31.15.aq

DOI: 10.7498/aps.64.034209

1 引言

光子晶体是一种介电常数在空间结构上具有周期特性的人造材料. 由于其光子带隙和光子局域特性, 通过设计和调节光子晶体结构能够非常方便地控制光在光子晶体中的传播性能, 因此光子晶体在光学器件的研制、开发以及测量等方面有着重要的应用, 如光子晶体滤波器^[1,2]、发光二极管^[3]和光子晶体温度传感器^[4]等. 随着光通讯和光传感技术的发展, 人们对光子晶体进行了广泛的理论与实验研究, 并通过改变材料的介电性质或其空间排列方式来调控光子晶体中光子传播状态的能力^[5,6].

光滤波器是一种用来消除干扰波长的光学器件, 其作用就是得到或消除一个或多个特定频率, 是光信息系统中的关键器件之一. 利用光子晶体的优点研制光子晶体滤波器已经成为人们重点研究的课题^[7,8]. 近几年来, 国内外一些学者对

一维光子晶体进行了一系列研究与探索. 例如, Zhang等^[9]制备出一种多通道可调的太赫兹滤波器, Chang等^[10]分析了含有耦合缺陷的光子晶体的可调谐性能, Dai等^[11]设计了一种基于等离子体量子阱结构的双通道窄带可调滤波器. 但对于多系双局域态一维光子晶体的可调谐滤波特性还未报道, 若对光子晶体施加应力, 则光子晶体介质层厚度和折射率必然会产生变化, 从而改变光子晶体的光子带隙特性, 这就使通过外加应力来调制光子晶体的带隙特性成为可能.

本文研究了基于介观压光效应的多系双局域态一维光子晶体的滤波特性, 使其所滤出的波长控制在近红外波段. 从麦克斯韦方程组出发并结合光子晶体的周期性结构, 利用紧束缚方法分析了双缺陷模的产生机理, 采用传输矩阵法研究了一维光子晶体的光学传输特性和其介质层的参数对透射谱的影响, 并根据光子晶体的介观压光效应使其介质层厚度发生变化的原理, 理论分析得出应力的变化可使光子晶体缺陷峰产生漂移. 在此基础上, 数值

* 国家自然科学基金(批准号: 61201112)和河北省自然科学基金(批准号: F2013203250, F2012203169)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: wdchen1971@sohu.com

模拟了多系双局域态一维光子晶体的缺陷模特性,并得出缺陷峰位置与外加应力所产生的应变之间的关系.

2 建立模型

电磁波在光子晶体中的传播状态用波动微分方程可表示为^[12,13]

$$\nabla^2 \mathbf{E}(\mathbf{z}) + \varepsilon(\mathbf{z}) \frac{\omega^2}{c^2} \mathbf{E}(\mathbf{z}) = 0, \quad (1)$$

式中 $\varepsilon(\mathbf{z})$ 为介质层的介电常数, ω_i 为入射光波频率, c 为光速.

当光子晶体存在单缺陷时,在禁带中出现一个频率为 ω 的局域模,若 $\int \mathbf{E}(\mathbf{z}) \cdot \mathbf{E}(\mathbf{z}) d\mathbf{z} = 1$, 则(1)式可改写为

$$-\left(\nabla^2 + (\varepsilon_i(\mathbf{z}) - 1) \frac{\omega_i^2}{c^2}\right) \mathbf{E}(\mathbf{z}) = \frac{\omega_i^2}{c^2} \mathbf{E}(\mathbf{z}). \quad (2)$$

当光子晶体存在两个缺陷层时,频率为 ω 局域模会分裂成频率不同的两个模式 ω_1 和 ω_2 , 用紧束

缚方法^[14]推导由双局域态光子晶体产生的双缺陷模的频率关系式,可得

$$\omega_j = \omega \left(\frac{1 + J_0 \mp J_1 \mp J_2}{1 \mp J_2} \right)^{1/2}, \quad (j = 1, 2), \quad (3)$$

式中 J_0 为单缺陷作用项,而 J_1 和 J_2 分别为两缺陷相互作用的耦合系数.假设两缺陷层中心距离为 D , D 越小两缺陷模的相互作用越强, J_1 和 J_2 就越大,因此两缺陷模频率 ω_1 和 ω_2 相差的就越远,反之亦然.

图1为 D 取不同值时光子晶体禁带中缺陷峰的情况,从图1中可以发现,图1(a)中两缺陷峰近似为一个,在图1(b), (c) 和 (d) 中都可以看到两个相对明显的缺陷峰.当 $D = \frac{1}{4}\lambda_0$ 时双局域态光子晶体能在1—2.1 μm 的波长范围内形成一个明显的光子禁带,且两缺陷模分离的最明显,两个缺陷峰的半高全宽(FWHM)分别为3.7 nm和2.2 nm,透射率都接近于1.为了得到频率间隔较大的两个缺陷峰,以下仅对两缺陷层相距较近的光子晶体进行讨论.

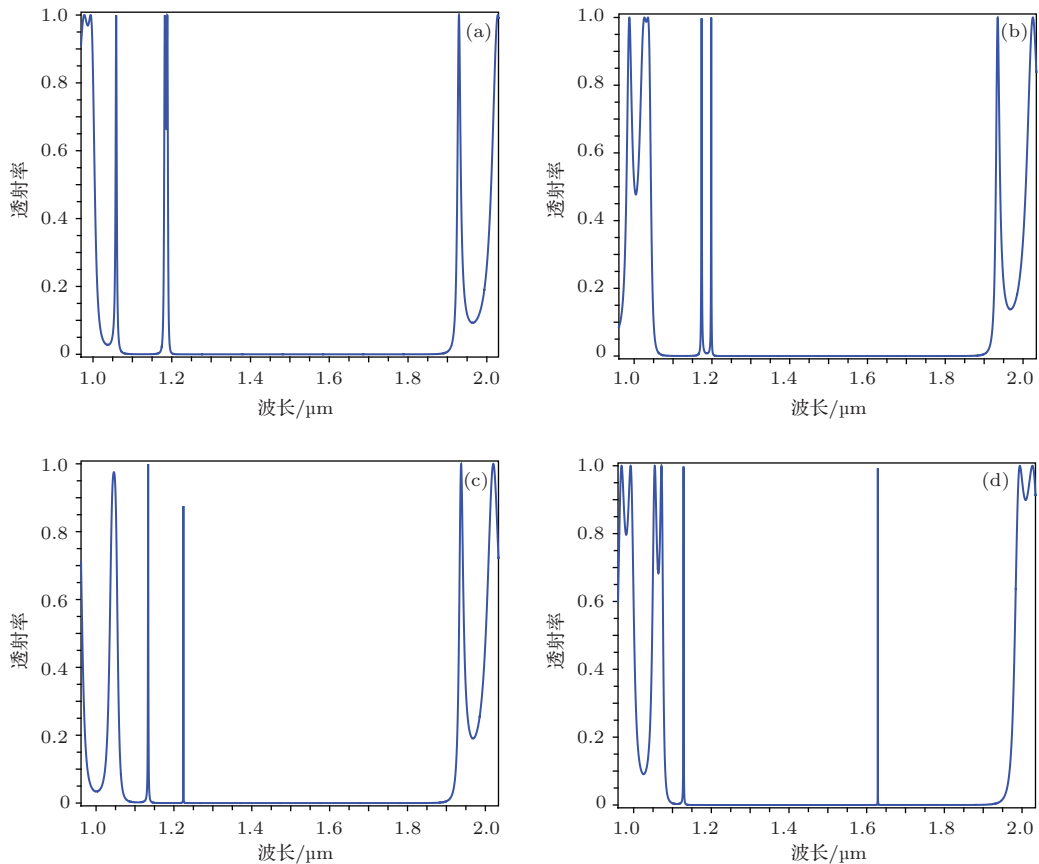


图1 D 取不同值时双局域态光子晶体的透射谱 (a) $D = \frac{5}{2}\lambda_0$; (b) $D = \frac{7}{4}\lambda_0$; (c) $D = \lambda_0$; (d) $D = \frac{1}{4}\lambda_0$

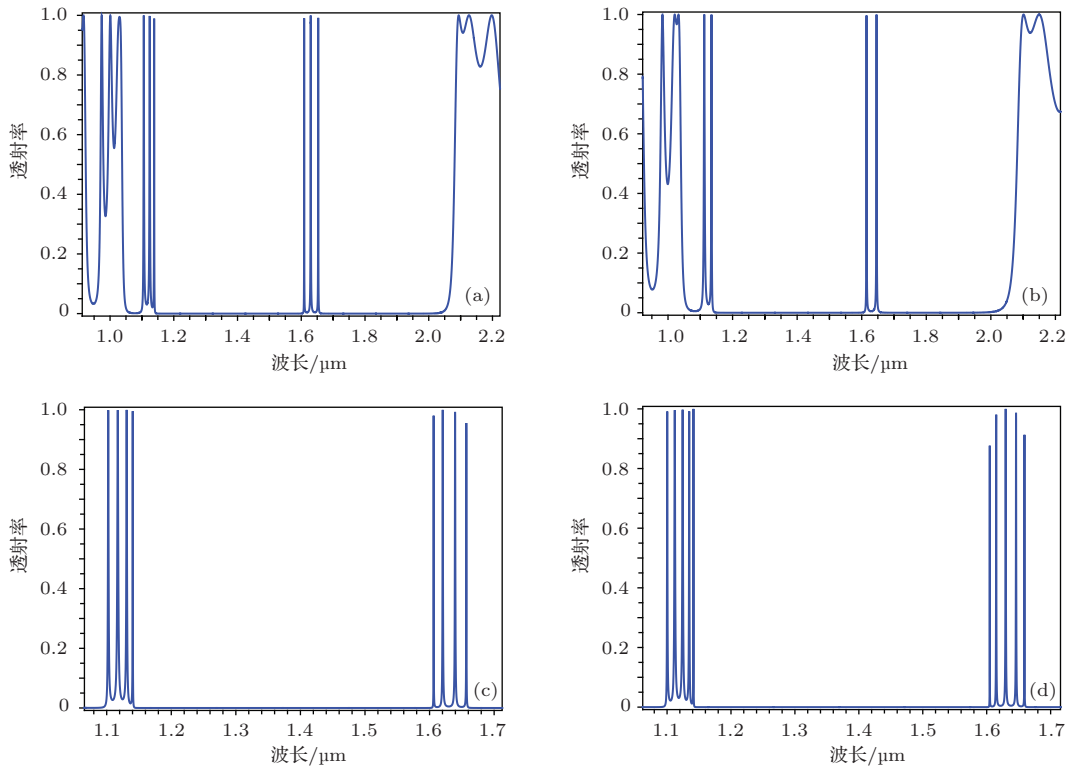


图3 N 取不同值时双局域态光子晶体的透射谱 (a) $N = 2$; (b) $N = 3$; (c) $N = 4$; (d) $N = 5$

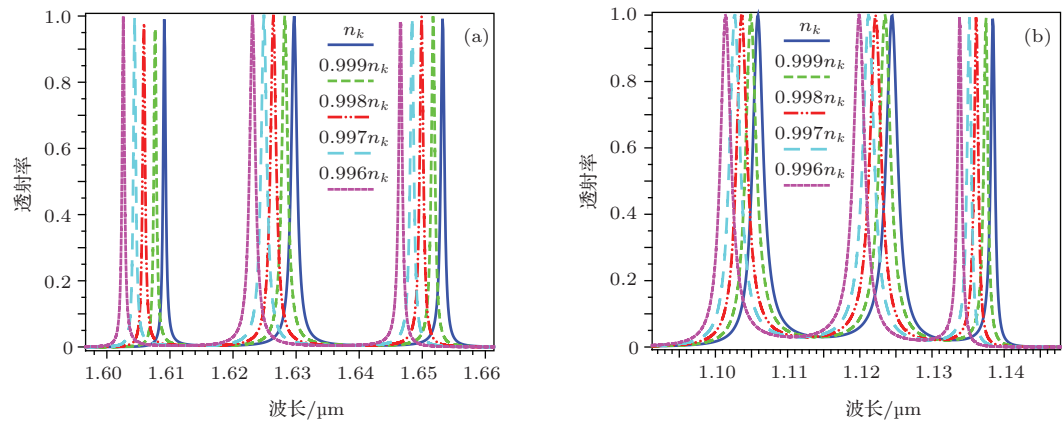


图4 折射率对多系数双局域态光子晶体透射谱的影响 (a) 高波段; (b) 低波段

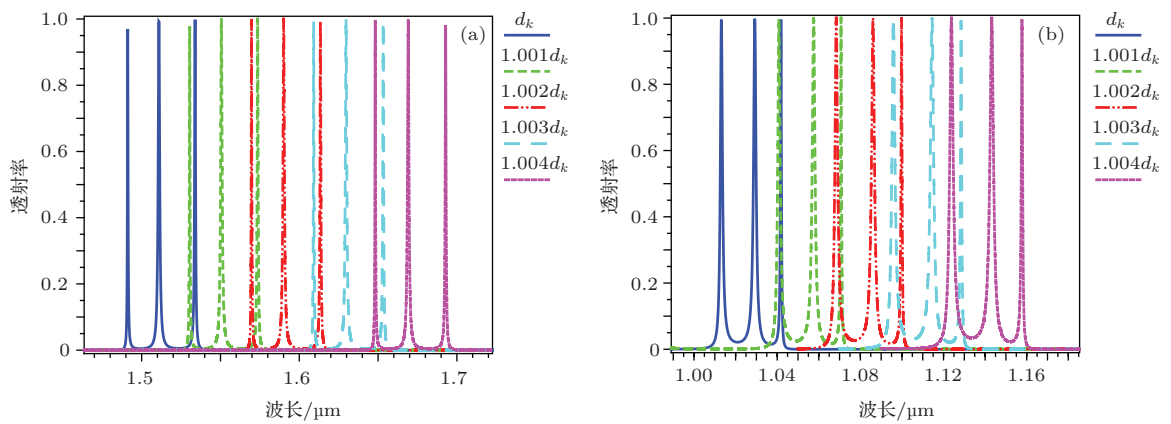


图5 厚度对多系数双局域态光子晶体透射谱的影响 (a) 高波段; (b) 低波段

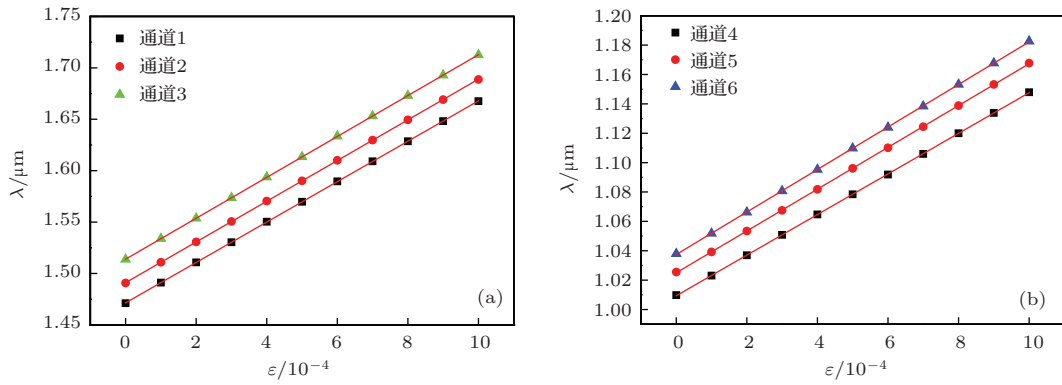


图6 缺陷峰位置随应变变化图 (a) 高波段; (b) 低波段

当一束光正入射一维镜像光子晶体时, 单轴应力所产生的应变对透射谱中六个缺陷峰中心波长的影响情况如图6所示. 图中 ε 代表的是对光子晶体施加轴向应力时所产生的应变, λ 表示缺陷峰的中心波长. 从图6中可以看出, 各缺陷峰位置与应变之间都近似为线性关系, 这与(3)—(7)式的推导结果是完全一致的. 由图6可知, 该结构滤波器高、低波段的灵敏度分别为 $S_1 = \frac{\Delta\lambda}{\Delta\varepsilon} = 0.2 \text{ nm}/0.01\%$ 和 $S_2 = \frac{\Delta\lambda}{\Delta\varepsilon} = 0.14 \text{ nm}/0.01\%$.

4 结 论

首先利用紧束缚方法分析了双局域光子晶体缺陷模的产生机理, 然后从传输矩阵法出发, 研究了由材料Si, SiO₂和水晶组成的多系双局域态光子晶体的缺陷峰位置同介质层折射率和厚度的关系, 最终探讨了光子晶体在应力作用下缺陷峰位置的变化规律. 结果表明: 具有反对称结构的光子晶体能在透射谱中出现成对的缺陷峰, 从而使滤波通道成倍增加, 结构为(AB)³A(CCA(BA)³)³的光子晶体能够在近红外波段形成一个比较明显的光子禁带, 且在此光子禁带中存在六个半高全宽在0.3—0.9 nm之间的高透射率缺陷峰. 随着介质层折射率和厚度的增加, 缺陷峰都向长波长方向移动. 而且, 缺陷峰对单轴应力非常敏感, 随着外加单轴应力所产生应变的增加, 缺陷峰位置也会发生红移. 该光子晶体多通道滤波器的透射滤波性能优良、可调谐性好, 高、低波段的灵敏度分别为 $S_1 = \frac{\Delta\lambda}{\Delta\varepsilon} = 0.2 \text{ nm}/0.01\%$ 和 $S_2 = \frac{\Delta\lambda}{\Delta\varepsilon} = 0.14 \text{ nm}/0.01\%$, 从而为高灵敏应力传感器的设计提供了一定的理论参考.

参考文献

- [1] Zhang H, Bai J J, Guo P, Wang X H, Chang S J 2009 *Optoelectr. Lett.* **5** 0169
- [2] He Z Y, Jiao H F, Cheng X B, Zhang J L, Wang Z S 2014 *Acta Opt. Sin.* **34** 0231002 (in Chinese) [贺芝宇, 焦宏飞, 程鑫彬, 张锦龙, 王占山 2014 光学学报 **34** 0231002]
- [3] Yue Q Y, Kong F M, Li K, Zhao J 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 208502 (in Chinese) [岳庆炆, 孔凡敏, 李康, 赵佳 2012 物理学报 **61** 208502]
- [4] Qian X Z 2010 *Chin. J. Quantum.* **27** 463 (in Chinese) [钱祥忠 2010 量子电子学报 **27** 463]
- [5] Li C L, Wang T, Pu J X 2010 *Optoelectr. Lett.* **6** 0363
- [6] Yang H W, Xu D 2011 *Eur. Phys. J. D* **64** 387
- [7] Li W S, Zhang Q, Fu Y H 2014 *J. Synth. Cryst.* **43** 465 (in Chinese) [李文胜, 张琴, 付艳华 2014 人工晶体学报 **43** 465]
- [8] Dong Q Y, Ma S Y, Wang H, Qiang H X 2011 *Acta Opt. Sin.* **40** 1076 (in Chinese) [董秋云, 马书云, 王慧, 强海霞 2011 光学学报 **40** 1076]
- [9] Zhang H Y, Gao Y, Zhang Y P, Wang S F 2011 *Chin. Phys. B* **20** 094101
- [10] Tsung-Wen Chang, Chien-Jang Wu 2013 *Optik* **124** 2028
- [11] Dai Y, Liu S B, Wang S Y, Kong X K, Chen C 2014 *Chin. Phys. B* **23** 065202
- [12] Shen J, Ma G H, Zhang Z J, Hua Z Y, Tang X H 2006 *Acta Opt. Sin.* **26** 1404 (in Chinese) [沈杰, 马国宏, 章壮健, 华中一, 唐星海 2006 光学学报 **26** 1404]
- [13] Huang X Q, Cui Y P 2003 *Chin. Phys. Lett.* **20** 1721
- [14] Chen X F, Jiang M P, Shen X M, Jin Y, Huang Z Y 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 5709 (in Chinese) [陈宪锋, 蒋美萍, 沈小明, 金钦, 黄正逸 2008 物理学报 **57** 5709]
- [15] Lotfi E, Jamshidi K-Ghaleh, Moslem F, Masalehdan H 2010 *Eur. Phys. J. D* **60** 369
- [16] Tang J, Yang H J, Xu Q, Liao J W, Yuan S, Hu Y 2010 *Infrared Laser Eng.* **39** 76 (in Chinese) [唐军, 杨华军, 徐权, 廖建文, 袁舒, 胡渝 2010 红外与激光工程 **39** 76]
- [17] Feng R T, Li J Y, Wen T D, Xu L P, Li Q L 2013 *Chin. J. Sens. Actuators* **26** 1073 (in Chinese) [冯瑞婷, 李俊漾, 温廷敦, 许丽萍, 李乾利 2013 传感技术学报 **26** 1073]
- [18] Xie L Y, Xiao W B, Huang G Q, Hu A R, Liu J T 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 057803 (in Chinese) [谢凌云, 肖文波, 黄国庆, 胡爱荣, 刘江涛 2014 物理学报 **63** 057803]

Tunable filtering properties of the polyphyly photonic crystal with double local states*

Zhu Qi-Guang¹⁾ Dong Xin-Yu¹⁾ Wang Chun-Fang²⁾ Wang Ning¹⁾ Chen Wei-Dong^{1)†}

1) (*Key Laboratory for Special Fiber and Fiber Sensor of Hebei Province, School of Information Science and Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China*)

2) (*School of Liren, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China*)

(Received 22 May 2014; revised manuscript received 11 September 2014)

Abstract

The mechanism of generating double defect modes in a photonic crystal with double local states is analyzed based on the tight-binding method. The optical transmission characteristic of a one-dimensional photonic crystal is studied using the transfer matrix method. And the relationship between the transmission spectrum and structural parameters of the photonic crystal is obtained. The mesoscopic calender effect is discussed when the photonic crystal is exerted on by a homotaxial stress on the basis of these theories. Therefore, a multichannel filter with a simple structure which can be modulated by the stress in the near infrared band is designed. Numerical simulation results show that the defect modes may produce a red shift with the increase of the dielectric layers' refractive index or thickness. When the uniaxial tensile stress is applied on the polyphyly photonic crystal with double local states, all defect peaks will move to the direction of the long wavelength, and the values of these defect peaks remain unchanged basically. Through numerical fitting, the relationship between these defect peaks' central wavelengths and the size of the strain produced by the homotaxial tensile stress on the photonic crystal is linear. This kind of photonic crystal filter with a simple structure has good tunability and has practical application value in the manufacture of a series of exquisite photonic crystal lasers, wavelength division multiplexers and other precision instruments.

Keywords: photonic crystal, double local state, mesoscopic calender, tight binding method

PACS: 42.55.Tv, 63.20.Pw, 78.66.-w, 31.15.aq

DOI: [10.7498/aps.64.034209](https://doi.org/10.7498/aps.64.034209)

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61201112), and the Natural Science Foundation of Hebei Province, China (Grant Nos. F2013203250, F2012203169).

† Corresponding author. E-mail: wdchen1971@sohu.com