

文章编号: 0253-2239(2010)01-0237-04

光子晶体微腔温度响应特性研究

傅海威¹ 赵辉¹ 乔学光² 李岩¹ 赵大壮¹ 雍振¹

(¹ 西安石油大学光电油气测井与检测教育部重点实验室, 陕西 西安 710065)
² 西北大学校长办公室, 陕西 西安 710069)

摘要 利用平面波展开法对由硅(Si)介质柱构成的二维正方晶格光子晶体在 TM 模式下的能带进行计算。构造了光子晶体微腔,利用时域有限差分法对该光子晶体微腔的谐振特性进行了数值模拟,得到了缺陷态模场分布。考虑硅的热膨胀效应和热光效应对硅性质的影响,引入到光子晶体微腔谐振模式的计算中,模拟计算了微腔谐振波长随温度的变化关系。结果表明,随着温度的升高光子晶体微腔的谐振波长增大,温度每升高 1 °C,波长向长波漂移 6.7 pm,而且具有良好的线性。光子晶体微腔的这种特性可以用于温度传感,具有一定的实用意义。

关键词 光子晶体微腔;谐振波长;温度传感;时域有限差分法

中图分类号 O736 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20103001.0237

Study on Temperature Response of Photonic Crystal Microcavity

Fu Haiwei¹ Zhao Hui¹ Qiao Xueguang² Li Yan¹ Zhao Dazhuang¹ Yong Zhen¹

(¹ Key Laboratory of Photoelectricity Gas-Oil Logging and Detecting, Ministry of Education, Xi'an Shiyou University, Xi'an, Shaanxi 710065, China)
² Principal's Office, Northwest University, Xi'an, Shaanxi 710069, China)

Abstract The band structure of two-dimensional photonic crystals consisting of the silicon (Si) dielectric cylinder square lattices is calculated by using plane-wave expansion method for the TM mode. Photonic crystal microcavity structure is designed. The defect-state field of the microcavity is simulated by finite-difference time-domain (FDTD) method, so the mode field distribution of defects is obtained. The thermal expansion and thermal-optic effect of silicon is taken into account, the resonant wavelengths of the microcavity are also calculated by FDTD method under different temperature. The results indicate that the resonant wavelength increases linearly while the temperature rising. The wavelength shift is 6.7 pm/°C. This characteristic of photonic crystal microcavity can be used for temperature sensing, which has a certain degree of practical significance.

Key words photonic crystal microcavity; resonant wavelength; temperature sensing; finite-difference time-domain method

1 引 言

光子晶体是由 Yablonovitch^[1] 和 John^[2] 在讨论周期性电介质结构对材料中光传播行为的影响时分别各自独立提出来的,因其具有控制光子的流动能力而备受关注。光子晶体一个重要性质就是在其周期性结构中引入缺陷,破坏其周期性,从而在光子晶体的能隙中出现局域化的缺陷模^[3~5]。有缺陷的

光子晶体可以应用于波导^[6]、滤波器等光子晶体器件中。光子晶体微腔与传统谐振腔相比,具有品质因数高、器件体积小、探测精度高以及不受电磁干扰等优点^[7]。光子晶体已经被用于传感领域, T. Stomeo^[8] 等基于二维光子晶体在压力传感方面做了较为细致的研究,而光子晶体传感在温度领域的研究还处于探索阶段。

收稿日期: 2009-05-11; 收到修改稿日期: 2009-06-10

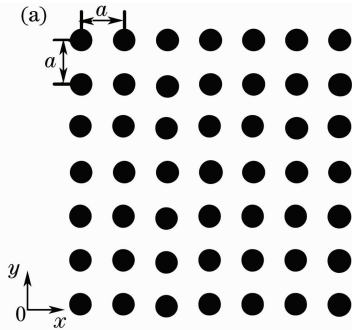
基金项目: 国家自然科学基金(60654001,60727004)、国家 863 计划(2006AA06Z210,2007AA03Z413)和西安市重大技术创新项目(GG06004)资助课题。

作者简介: 傅海威(1966—),男,博士,教授,主要从事光纤传感理论与技术方面的研究。E-mail: hwf@xsyu.edu.cn

本文提出了一种应用光子晶体微腔谐振特性检测温度变化的方法。利用平面波展开法^[9]计算了由硅构成的光子晶体能带。构造光子晶体微腔,利用时域有限差分法^[10~12]对该微腔的谐振特性进行了数值模拟,得到了缺陷态模场分布。考虑硅的热膨胀效应和热光效应对硅性质的影响,引入到对光子晶体微腔谐振模式的计算中,模拟计算了微腔谐振波长随温度的变化关系。该研究对光子晶体在传感领域的应用和设计提供了理论参考。

2 建立模型

二维正方晶格光子晶体典型结构如图 1(a)所示。 r 为介质柱的半径, a 代表相邻介质柱的中心距离,称为晶格常量,取 $a=640$ nm, r 与 a 的比值为 0.15,Si 介质柱的相对介电常数 $\epsilon_r=11.9$;介质



柱以外的部分为空气,其相对介电常数为 1。

利用平面波展开法将电磁场在倒格矢空间中以平面波叠加的形式展开,将麦克斯韦方程组转化为本征方程

$$\Sigma(\mathbf{k} + \mathbf{G}') \cdot (\mathbf{k} + \mathbf{G}) \hat{k}(\mathbf{G} - \mathbf{G}') A(\mathbf{k}, \mathbf{G}') = \frac{\omega^2}{c^2} A(\mathbf{k}, \mathbf{G}), \quad (1)$$

式中 \mathbf{k} 为二维波矢; ω 表示角频率; $A(\mathbf{k}, \mathbf{G})$ 是电场强度 z 方向的分量 $E_z(\mathbf{r}, \omega)$ 的傅里叶系数; $\hat{k}(\mathbf{G})$ 是周期分布的 $\epsilon^{-1}(\mathbf{r})$ 的傅里叶系数; \mathbf{G} 为 \mathbf{r} 的倒格矢, \mathbf{r} 为 x 和 y 方向的矢量。

解在不同波矢 \mathbf{k} 情况下的本征值就可以得到二维正方晶格光子晶体在 TM 模式下的能带。经数值计算得到的能带如图 1(b)所示,其光子带隙的波长范围是 1333.333~1828.571 nm。

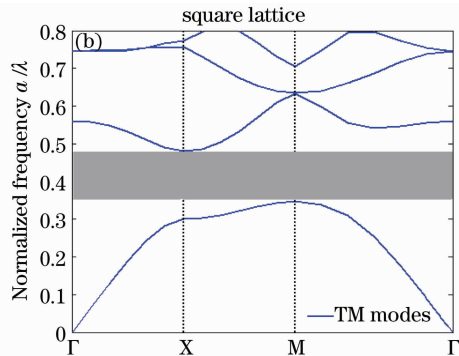


图 1 正方晶格光子晶体结构(a)及能带(b)

Fig. 1 Structure and energy band of square lattice photonic crystal. (a) Square lattice; (b) energy band

通过增加或者减去单个介质柱,也可以通过变换结构中单个介质柱的半径和介电常数等参数,形成光子晶体微腔。在光子晶体中引入点缺陷后,由于这些点缺陷对原有的空间对称性产生微扰,形成一个具有自身共振频率的微腔。在图 1(a)二维光子晶体中去掉一个介质柱,构成具有带隙结构的微腔进行模拟计算,其结构如图 2 所示。

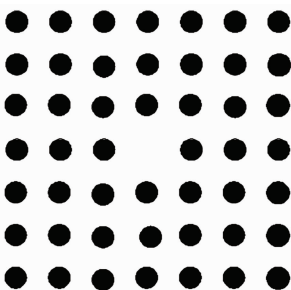


图 2 正方晶格光子晶体微腔

Fig. 2 Square lattice photonic crystal microcavity

3 温度变化对光子晶体折射率和结构参数的影响

考虑介质的热光效应和热膨胀效应,对于采用 Si 制成的光子晶体微腔,微腔受热会产生形变和折射率的变化。设 Si 的热膨胀系数为 ϵ ,热光系数为 α ,温度变化量为 ΔT 。由于 Si 的弹性模量 E 很大,微腔中空气膨胀对变形的影响可忽略。根据热力学理论,假设 Si 自由膨胀,各个方向产生相同的线应变

$$\xi = \epsilon \cdot \Delta T. \quad (2)$$

介质柱横截面会产生等比例放大或缩小,介质柱半径变化与应变之间的关系为

$$r' = r(1 + \xi)$$

晶格常数的变化关系为

$$a' = a(1 + \xi), \text{ 且 } r'/a' = r/a$$

由于光子晶体微腔 Si 介质柱的折射率均匀分布且各向同性,温度对折射率的影响为

$$n(T) = n_0 + \Delta n(T) = n_0 + \frac{\partial n}{\partial T} \Delta T, \quad (3)$$

式中 n_0 代表 0°C 时 Si 的折射率; $\partial n/\partial T$ 代表光子晶体的热光系数, 因此(3)式可以写成

$$n(T) = n_0 + \alpha \Delta T. \quad (4)$$

4 数值计算

采用时域有限差分法分析了光子晶体微腔在温度影响下的谐振特性, 微腔受热将引起 Si 介质柱半径的变化, 同时介质的折射率也发生变化。

在数值计算中选取的参数如下: 采用 32×32 的差分网格近似模拟一个光子晶体元胞, 吸收边界层数为 10 层元胞网格, 整个计算区域为 400×400 格的差分网。激励源采用调制高斯脉冲

$$E(t) = -\cos \omega t \exp\left[-\frac{4\pi(t-t_0)^2}{\tau^2}\right], \quad (5)$$

式中中心频率设为 1.944×10^{14} Hz, $\tau = 1.333 \times 10^{-14}$, 所以脉冲宽度为 3.0×10^{14} Hz。计算空间步长 $\Delta x = \Delta y = 640/32 = 20$ nm, 时间步长 $\Delta t = \Delta x/(2c)$, 其中 c 为真空中的光速。在测温范围内, 单晶硅的热膨胀系数和热光系数分别为 $4.15 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ 和 $2 \times 10^{-4}/^\circ\text{C}$ 。

计算 8192 时间步, 光子晶体微腔的模场分布如图 3 所示。 0°C 时, 谐振频率为 $f_1 = 1.866384 \times 10^{14}$ Hz (对应谐振波长 $\lambda_1 = 1607.386$ nm); 10°C 时, 谐振频率为 $f_2 = 1.866306 \times 10^{14}$ Hz (对应谐振波长 $\lambda_2 = 1607.453$ nm), 谐振波长向长波漂移, 波长漂移量为 $\Delta\lambda = 0.067$ nm。

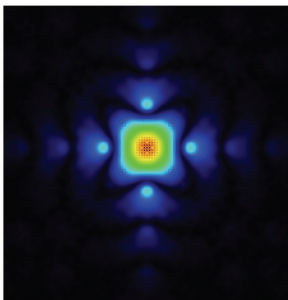


图 3 光子晶体微腔的模场分布

Fig. 3 Mode distribution of photonic crystal microcavity

在 $0 \sim 100^\circ\text{C}$ 的范围内, 温度每改变 10°C , 记录谐振波长, 得到温度与波长关系如图 4 所示。由图 4 可以看出, 光子晶体微腔谐振波长随温度的升高而增大, 具有良好的线性, 且谐振波长在光子带隙的波长范围内。光子晶体微腔谐振波长随温度关系为

$$\lambda = 0.0067\Delta T + 1607.386. \quad (6)$$

温度响应灵敏度为 $6.7 \text{ pm}/^\circ\text{C}$, 温度变化范围为 $0 \sim 100^\circ\text{C}$, 线性度 $R^2 = 0.998$ 。数值模拟结果表明, 光子晶体谐振腔可以用于传感测量中的温度传感器的核心器件。

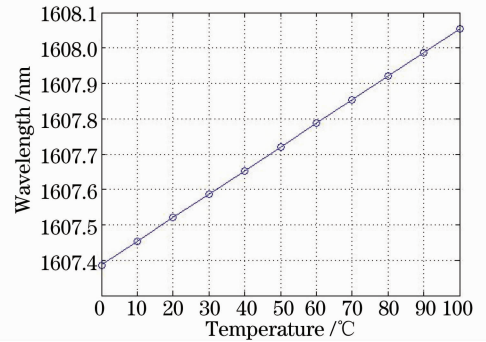


图 4 温度对应波长的关系

Fig. 4 Relation between temperature and wavelength

5 结 论

考虑光子晶体材料的热光效应和热膨胀效应, 借助时域有限差分法对二维正方晶格光子晶体微腔进行数值分析和模拟, 得出温度的变化引起光子晶体微腔的谐振波长漂移, 在 $0 \sim 100^\circ\text{C}$ 的范围内, 谐振波长与温度间呈线性关系, 且谐振波长在光子带隙的波长范围内, 温度响应灵敏度为 $6.7 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ 。考虑到一般使用的解调仪的有效分辨率为 1 pm , 所以该光子晶体的仪器分辨率可达到 0.2°C 。

参 考 文 献

- 1 E. Yablonovitch. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1987, **58**(20): 2059~2062
- 2 S. John. Strong localization of photos in certain disordered dielectric superlattices [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1987, **58**(23): 2486~2489
- 3 R. Pierre. Villeneuve, Shanhui Fan, J. D. Joannopoulos. Microcavities in photonic crystals: mode symmetry, tenability, and coupling efficiency [J]. *Phys. Rev. B*, 1996, **54**(11): 7837~7842
- 4 Sun Zhihong. The study of the defect modes and coupling characteristic of photonic crystals[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(7): 984~989
孙志红. 光子晶体局域缺陷模及耦合特性研究[J]. *光学学报*, 2005, **25**(7): 984~989
- 5 Chen Libai, Guo Zhenning, Lin Jieben. Study on application of one-dimensional photonic crystal microcavity to luminescence of silicon-based materia [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(9): 1793~1797
陈丽白, 郭震宁, 林介本. 一维光子晶体微腔在硅基材料发光中的应用研究[J]. *光学学报*, 2008, **28**(9): 1793~1797
- 6 Hu Jie, Chen Heming. Loss characteristics of photonic crystal fiber as terahertz waveguide [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(4): 567~572
胡 婕, 陈鹤鸣. 光子晶体太赫兹波导的损耗特性[J]. *中国激光*, 2008, **35**(4): 567~572

- 7 R. D. Meade, A. Devenyi, J. D. Joannopoulos *et al.*. Novel applications of photonic bandgap materials: low-loss bends and high Q cavities[J]. *J. Appl. Phys.*, 1994, **75**(10): 4753~4755
- 8 T. Stomeo, M. Grande, A. Qualtieri *et al.*. Fabrication of force sensors based on two-dimensional photonic crystal technology [J]. *Microelectronic Engineering*, 2007, **84**(5-8): 1450~1453
- 9 K. Sakoda. Optical Properties of Photonic Crystals [M]. Springer, 2004
- 10 K. S. Yee. Numerical solution of initial boundary value problems involving maxwell equations in isotropic media[J]. *IEEE Trans. Antenn. Propag.*, 1966, **14**(3): 302~307
- 11 Gao Benqing. FDTD Method [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1995
高本庆. 时域有限差分法[M]. 北京:国防工业出版社,1995
- 12 Ge Debiao, Yan Yubo. Finite-Difference Time-Domain Method for Electromagnetic Waves(Second Edition)[M]. Xi'an : Xidian University Press, 2005
葛德彪, 闫玉波. 电磁波时域有限差分方法(第二版)[M]. 西安:西安电子科技大学出版社,2005